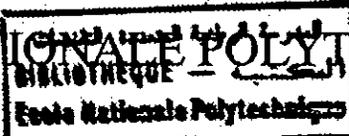


REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'EDUCATION NATIONALE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



DEPARTEMENT : GENIE HYDRAULIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

THEME

**Approche par modélisation
statistique des apports
liquides et solides dans un
bassin versant**

Préparé par :

Dr. M. BERKANI

Etudié par:

Melle. LEILA BOURENANE

Dirigé par :

Dr. M. BERKANI
Mr. M. OUAMER BENHADJ

Promotion JUIN 1996

E.N.P. 10. Avenue Hassen Badi - El-Harrach - ALGER

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

A

L'YVES ET M^{ED} AMJR

Je dédie.

REMERCIEMENTS

Cette étude sur l'érosion et les transports solides en Algérie, n'aurait pu être menée à bien sans la contribution d'un grand nombre de personnes.

De ce fait, je voudrai tout d'abord remercier monsieur **M. BERKANI**, docteur-ingenieur et chargé de cours à l'**ENP**, pour m'avoir encadrée durant toute ma formation d'hydraulicienne, ainsi pour m'avoir inspiré ce présent sujet de fin d'étude.

Je tiens aussi ma gratitude à monsieur **Mrd OUIAMER BENBADI**, étudiant en magister pour son aide remarquable.

Et biensur, à monsieur **CHERRARO**, docteur-ingenieur et enseignant à l'**ENP**, pour ces conseils précieux.

J'adresse mes vifs remerciements à l'ensemble du personnel de l'**ANRS**, service d'hydrologie, dirigé par **M. BOZIGIERA**, pour l'accueil chaleureux et les moyens de travail qu'on a mis à ma disposition.

Mes reconnaissances vont directement à l'ensemble des enseignants du département hydraulique, qui ont contribué à la formation de notre promotion.

Enfin, je ne saurai oublier l'apport moral et les encouragements intenses que mon **MARI** et ma **FAMILLE** ont éprouvés à mon égard.

Résumé

Sujet:

Approche par modélisation statistique des apports liquides et solides dans un bassin versant.

Objectif:

Cette étude concernant le phénomène des apports liquides et solides, a permis une analyse globale du comportement des sédiments et l'évaluation sommaire mais quantitative de la possibilité de prévisions des apports.

Ceci a été réalisé, en se basant sur l'analyse statistique des hydrogrammes de crues en spécifiant la montée de la crue de la descente.

Nous avons ainsi élaboré un modèle caractérisant chaque cas.

ABSTRACT

SUBJECT:

Approach by statistical model of sediment and liquid brought down by a water bassin.

OBJECTIVE:

This study allows an analysis of liquid and sediment brought down by a water bassin, in order to quantify and to forecast the phenomenon.

ملخص

الموضوع

دراسة تقريبيه نموذجية إحصائية
للحجوم السائلة والصلبة في الأحوال .

الهدف

تهدف هذه الدراسة إلى إيجاد تحليل شامل
كفي و كافي لظاهرة نقل الجزيئات الصلبة أثناء
حدوث الفيضانات من أجل الوصول إلى حل مستقبلي
موضوعي وذلك بالتنبؤ .
تم هذا العمل على أساس تحليل إحصائي لمنحنيات
الفيضانات وبتخصيص ظاهري صعود ونزول منسوب
المياه في الأودية أثناء هذه الفيضانات .

TABLE DES MATIERES

Résumé.....	3
INTRODUCTION.....	11
<u>PARTIE 1</u>	
CHAPITRE 1 :L'érosion.....	13
Introduction.....	13
1-1- Types d'érosion.....	13
1-1-1- L'érosion géologique.....	13
1-1-2- L'érosion des sols.....	13
1-1-3- L'érosion hydrique.....	13
1-2- Processus de l'érosion par ruissellement.....	14
1-3- Facteurs favorisant l'érosion.....	14
1-3-1- La lithologie.....	14
1-3-2- L'hydrologie.....	14
a) Le climat.....	14
b) La pluie.....	15
c) Le ruissellement.....	15
d) Les crues.....	15
d1) Les crues d'orages.....	15
d2) Les crues généralisées.....	17
1-3-3- La topographie.....	17
1-3-4- Le couvert végétal.....	17
1-3-5- L'influence de l'homme.....	17
1-4- Conséquences de l'érosion hydrique.....	17
CHAPITRE 2 : Le transport solide.....	20
Définition.....	20
2-1- Le transport solide.....	20

2-1-1- Le transport de fond (charriage).....	20
2-1-2- Le transport par suspension.....	20
2-1-3- Le transport par saltation.....	20
le transport solide.....	21
2-3- Quantification et prévision du transport solide.....	21
2-3-1- Méthodes empiriques.....	21
2-3-2- Application des équations du transport solide.....	21
2-3-3- Méthodes par modélisation.....	22
2-4- Rappel de quelques formules de quantification et prévision des apports solides.....	22
2-4-1- Formule de HENIN.....	22
2-4-2- Formule universelle de WISCHMEYER.....	23
2-4-3- TIXERONT.....	23
2-4-4- SOGREAH.....	23
2-4-5- DEMMAK.....	24
CHAPITRE 3 : Mécanisme des sédiments dans les retenues.....	25
Introduction.....	25
3-1- Mécanisme de l'envasement.....	25
3-2-1- Retenue envasée par « courant de densité »	25
3-2-2- Retenue envasée par charriage des particules grossières et décantations des particules fines.....	26
3-2-3- Retenue envasée par rouleaux de recirculation.....	26
CHAPITRE 4 : Méthodes de défenses contre l'érosion et la sédimentation.....	29
Introduction.....	29
4-1- Dans les interfluves.....	29
4-1-1- Procédés agrotechnique.....	29
4-1-2- Procédés hydrotechnique.....	29
4-2- Dans les cours d'eau.....	30

4-2-1- Revêtement des berges.....	30
4-2-2- Freinage de l'écoulement.....	30
4-2-3- Aménagement hydraulique.....	30

PARTIE 2

CHAPITRE 1 : Rappels théoriques de la statistique.....	32
Introduction.....	32
1-1- La réduction des données.....	32
1-1-1- Paramètres de position.....	32
1-1-2- Paramètres de dispersion.....	32
1-2- Estimation des paramètres d'une population par intervalle de confiance.....	33
a) Echantillons étendus.....	33
b) Petits échantillons.....	34
1-3- Estimation de la variance et de l'écart type.....	34
CHAPITRE 2: Tests statistiques.....	35
2-1- Test d'indépendance et de stationnarité.....	35
2-2- Test d'homogénéité et de stationnarité.....	35
2-3- Réflexion de la réalité.....	36
CHAPITRE 3: La régression.....	38
Introduction.....	38
3-1- Ajustement de courbes.....	38
3-2- La régression.....	38
3-2-1 Types de régression.....	39
a) La régression linéaire.....	39
b) Transformation des variables.....	39
3-3- La modélisation.....	39
3-4- Hypothèses du modèle.....	40
3-5- Avantages d'un modèle.....	40
3-6- Estimation des paramètres du modèle.....	40

3-7- Le coefficient de corrélation.....	42
3-8- Corrélation et causalité.....	43
3-9- Test de corrélation.....	48
3-10- Intervalle de prédiction.....	43
CHAPITRE 4 : Courbes des débits classés.....	45
Introduction.....	45
4-1- Répartition de la statistique d'observations en classes.....	45
4-2- Estimation des apports solides en suspension.....	46
CHAPITRE 5 : Les organigrammes.....	48
<u>PARTIE 3 : Analyse des résultats</u>	
Introduction.....	54
1- Données disponibles.....	57
2- Présentation des données brutes.....	57
3- Constitution des fichier de données.....	57
4- Répartition de l'échantillon d'étude en sous échantillons.....	58
5- Analyse des crues.....	61
6- La modélisation.....	61
7- Evaluation des intervalles de confiances des estimations A et B de α et β	67
8- Validité des modèles.....	72
9- Les intervalles de prédiction.....	74
10- Détermination des charges en sédiments dans le bassin de l'Isser.....	76
ANNEXE 1.....	80
ANNEXE 2.....	94
ANNEXE 3.....	110
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS.....	79
Références bibliographiques.....	114

INTRODUCTION

INTRODUCTION

L'érosion hydrique est un phénomène complexe très répandu en zone méditerranéenne, touchant particulièrement les pays du Maghreb (l'Algérie), dont il menace gravement les potentialités en eau et en sol.

Durant une certaine époque, l'homme pensait qu'en construisant des barrages, il réussissait à éliminer tous les problèmes pouvant découler du manque d'eau. Cependant, il ignorait le déséquilibre naturel qu'il a ainsi créé.

A présent, il se voit face à un phénomène difficile à maîtriser qui est l'envasement des barrages et retenues.

Le barrage, comme son nom l'indique, barre le chemin du cours d'eau. Ce dernier étant chargé en matières solides, entraînées au cours de l'écoulement, ne trouve pas d'issue pour les évacuer, alors elles se déposent dans les eaux calmes de la retenue au pied de la digue.

A long terme, ces dépôts se cumulent et occupent des volumes importants dans le barrage, d'où la réduction de sa capacité en eau.

L'Algérie, avec ses conditions géologique, climatique, physique, et socio-économique assez particulières est l'un des pays les plus touchés par le phénomène du transport solide. Elle présente un taux d'érosion spécifique très remarquable, allant de 2000 à 4000 t/km²/an selon les régions. Ceci explique la diminution de la réserve en eau superficielle de 20Mm³ annuellement; volume assez grand puisqu'il est équivalent à la capacité d'un barrage tel que "FERGOUG".

Maintenant que le problème existe, il faudrait essayer de lui trouver la solution logique et adéquate qui permettra d'éliminer, voire, minimiser les conséquences négatives pouvant en résulter.

L'objet de la présente étude est d'élaborer un outil simple, facilement utilisable permettant l'estimation des apports solides au niveau de l'exutoire d'un bassin versant.

Pour cela, nous avons d'abord défini le phénomène étudié, ensuite et en se basant sur les données du bassin de L'Isser, nous avons établi un modèle statistique à partir d'une corrélation entre débits liquides et solides, spécifiques aux crues, et enfin nous avons quantifié l'apport en sédiments du bassin.

avons

PARTIE 1

CHAPITRE 1

L'ÉROSION:

Introduction:

Soumise à différents facteurs climatique, géologique, hydrologique, et sociologique, la surface de la terre, constituée de roches et de sols différents (en plus des eaux), a tendance à s'altérer et se métamorphoser, en s'effritant et se décomposant en particules de dimensions différentes, ceci étant alors le phénomène d'érosion.

1-1- Types d'érosion:

L'érosion existe sous différentes formes:

1-1-1-L'érosion géologique:

Qui façonne la surface de la terre donnant ainsi des montagnes, vallées et plaines.

1-1-2-L'érosion des sols:

Qui est très liée aux terres agricoles.

1-1-3-L'érosion hydrique:

Qui consiste les réseaux de drainage (berges et fond des chenaux) par l'écoulement hydrique.

L'érosion hydrique se présente sous plusieurs types:

- ◆ L'érosion fluviale,
- ◆ L'érosion pluviale,

De sa part, l'érosion pluviale est de deux sortes:

- * Érosion par impact,
- * Érosion par ruissellement.

En ce qui concerne l'érosion par ruissellement, nous distinguons :

- ⇒ L'érosion en nappe,
- ⇒ Et, l'érosion en griffe et en rigole.

Celles-ci sont dues essentiellement aux eaux de surfaces.

- ⇒ L'érosion verticale, due aux eaux de profondeurs.

1-2- Processus de l'érosion par ruissellement:

En Algérie du nord, l'aspect le plus important est l'érosion pluviale, et plus précisément l'érosion par ruissellement.

Les terrains étant nus pour une raison ou pour une autre (déboisement, jachère, labour...). Le ruissellement dû aux eaux de pluie et surtout à la suite d'averses torrentielles, décape progressivement les horizons supérieurs du sol, jusqu'à atteindre parfois la roche mère.

La lame d'eau en mouvement le long des versants, se divise progressivement, les filets d'eau se regroupent dans les petites dénivellations du sol. Concentrée, cette eau déploie une force lui permettant d'arracher les obstacles ; grains de sable, pierres, végétaux...etc.

La force de l'érosion augmente avec :

- ◆ L'épaisseur de la lame d'eau ruisselée, donc avec l'intensité de la pluie,
- ◆ La longueur du bassin versant.

Cette force diminue avec le nombre et l'importance des obstacles rencontrés. Cette érosion pluviale rentre dans la catégorie des phénomènes, qui une fois déclenchés tendent par eux même à s'accélérer et s'intensifient en une chaîne inexorable.

Les matériaux arrachés au sol par l'érosion finissent par atteindre le réseau hydrographique.

1-3- Facteurs favorisant l'érosion:

Les conditions physique, géomorphologique, hydroclimatique et socio-économique auxquelles est soumise l'Algérie, plus exactement dans sa partie nord, sont particulièrement favorables au déclenchement et à l'accélération du phénomène d'érosion.

1-3-1- La lithologie:

Constituée à 75% de formations marneuses et argileuses, ceci offre une structure fragile et une faible résistance aux forces érosives.

1-3-2- L'hydrologie:**a) Le climat:**

Le climat de l'Algérie du nord est caractérisé par une irrégularité saisonnière et interannuelle des pluies et par une variation importante et continue des températures.

b) La pluie:

Etant un facteur essentiel de l'érosion. Dire la pluie, c'est sous entendre son intensité, celle-ci détermine la force de chute des gouttelettes d'eau sur le sol.

La vitesse de chute des gouttes d'eau atteint les 9 m/s créant ainsi une importante force hydrodynamique au point d'impact. Une fois détachée, la particule solide est mise en mouvement par le rejaillissement de la goutte de pluie sur la surface du sol, et entraînée par l'écoulement le long de la pente.

Donc, la pluie est le facteur actif de l'érosion des sols par l'eau. Elle constitue la source d'énergie nécessaire à l'arrachement des particules et leur transport.

Le rôle capital de l'énergie des gouttes de pluie a été démontré par différents auteurs, et notamment par HUDSON en Rhodésie (1960/73), WISHMEYER aux USA (1960), ROOSE en Afrique de l'ouest (1980) qui démontre à l'échelle du champ que la pluie possède 256 fois plus d'énergie que le ruissellement, ce dernier assure surtout le rôle de transport des particules détachées par la pluie.

Par contre en zone méditerranéenne et semi aride, sur les versants inclinés, où domine le ravinement et les sapements des berges, l'énergie du ruissellement devient la cause principale de l'érosion.

c) Le ruissellement:

Une fois le sol saturé, l'eau commence à s'écouler sur le sol; c'est ce qu'on appelle "ruissellement".

Le ruissellement provoque le déplacement des particules arrachées, les emportant ainsi vers le réseau de drainage du bassin versant. Si un obstacle les affronte, elles seront alors arrêtées et piégées le long du chemin qu'elles ont empruntées, sinon elles continuent à se déplacer jusqu'à atteindre les retenues pour s'y déposer.

d) Les crues:**d1) Les crues d'orages:**

Localisées et brutales, ces crues arrivent généralement en automne. Elles sont provoquées par des averses de début de saison, de type orageux, de courtes durées avec fortes intensités.

Les averses sont généralement localisées dans l'espace et se produisent sur des sols secs. Les capacités d'infiltration apparentes sont élevées. Les débits de pointe de ce type de crue peuvent atteindre et dépasser 100 m³/s, mais les lames ruissellées restent toujours très faibles, car une grande partie des précipitations d'automne sera entièrement absorbée par les vertisols profonds et secs, qui ne pourront donner du ruissellement rapide qu'après fermeture des fentes de retrait et imperméabilisation par saturation.

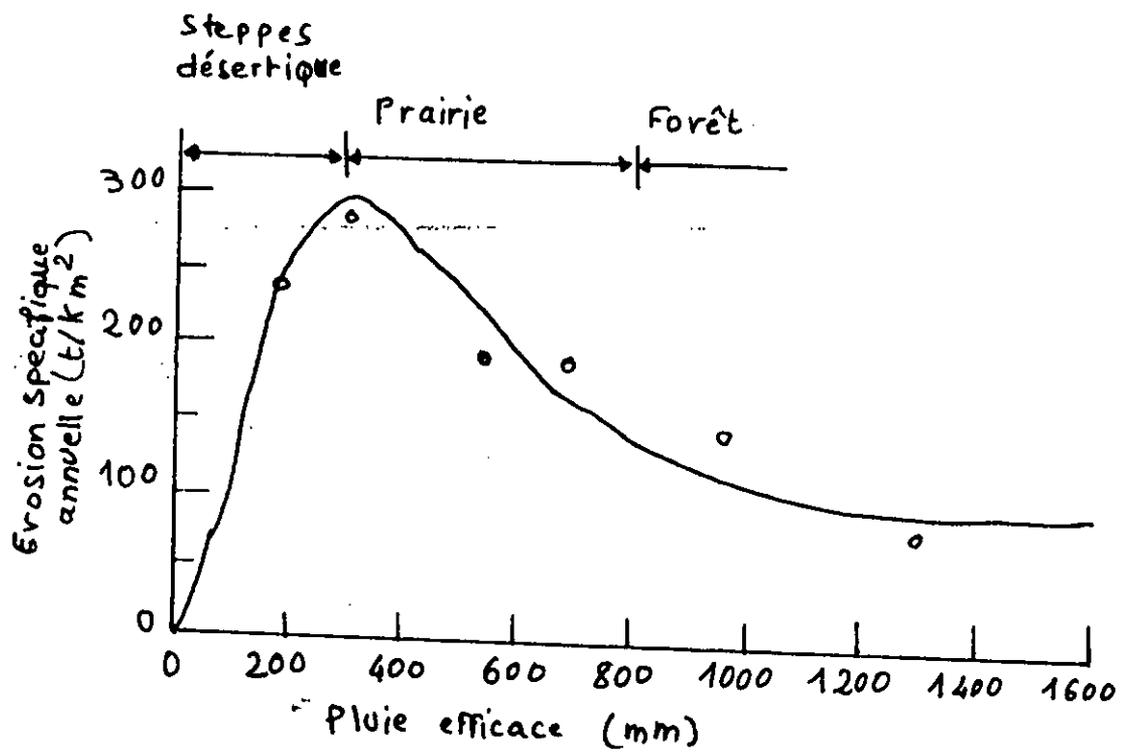


FIG I.3.4 - Diagramme schématique montrant la variation de l'érosion spécifique en fonction du climat.

d2) Les crues généralisées:

Ces crues surviennent généralement durant les saisons d'hivers et de printemps (février et mars). Elles sont générées par des précipitations de type cyclonique, frontales, généralisées dans l'espace, longues, régulières, continues, présentant des intensités faibles ou moyennes.

Se produisant sur des sols saturés et imperméables, elles entraînent des ruissellements importants et généralisés sur l'ensemble du bassin versant. L'infiltration étant faible.

1-3-3- La topographie:

Désigne les différents niveaux d'altitudes d'un bassin versant; elle détermine alors le relief.

Les vitesses d'écoulement sont très importantes si les pentes du bassin sont fortes, cela donne naissance à des écoulements torrentiels capables d'altérer la surface du sol et la désagréger, les particules arrachées seront alors entraînées par le courant.

1-3-4- Le couvert végétal:

Il présente une sorte d'isolant entre le sol et le milieu extérieur, avec tout ce qu'il comporte comme facteurs provoquant la dégradation du sol. Donc son existence assure une protection contre toute sorte d'érosion, quelque soit son origine (pluie, vent,...).

Le couvert végétal est très varié, il dépend du type de plantes qui le constituent.

Des études ont montré la variation de l'érosion spécifique en fonction du type de végétation. Elle atteint ses valeurs maximales dans les zones arides steppiques, tandis qu'elle est négligeable dans les contrées boisées.(FIG. 1-3-4)

1-3-5 L'influence de l'homme:

L'homme est le destructeur du premier ordre de son environnement; la diversité de ses activités le pousse à modifier le milieu naturel afin d'asseoir ses infrastructures.

Les activités ayant le plus grand impact sur l'érosion des sols sont l'agriculture, l'élevage et l'abattage du bois.

1-4- Conséquences de l'érosion hydrique:

L'érosion hydrique des bassins versants a des répercussions directes, à long terme, sur les infrastructures hydrotechniques à l'aval.

Une des plus importantes conséquences est l'envasement des barrages, et dans ce cas le dragage revient beaucoup plus cher que la construction d'un autre ouvrage.

A titre d'information, et dans le bassin versant de l'oued CHELIFF, le barrage de GHRIB qui avait une capacité de 280 Mm³ au départ (1939) ,se retrouve à 150 Mm³ en 1977 et seulement 120 Mm³ en 1980, ce qui montre une perte en volume d'eau de 30 Mm³ en trois années.(cf. Tab 1-4).

D'après les travaux de DEMMAK (1982) sur l'érosion et le transport solide ,le taux d'érosion spécifique atteint, en Algérie du nord , les valeurs les plus importantes du Maghreb.

On estime à 120 millions de tonnes la quantité de sédiments rejetée en mer chaque année, par les bassins tributaires de la Méditerranée.

Les autres conséquences sont moins apparentes , telles que la défertilisation des sols, les exhaussements et affouillement des lits des oueds, les dépôts de sédiments en bordures des cotes,...etc.

PARTIE 1

CHAPITRE 1

N°	Periode d'exploitation du barrage	Surface du BV S(km2)	Capacité sous RN Crn (hm3)	Apport moyen Ao(hm3)	Capacité résiduelle (hm3)	Volume envasé hm3	Envasement spécifique (m3/km2/an)	obs
1	Ghrib (35-86) 52ans	23.300	278.23	153	165.6	112.6	111	
2	Djorf Torba (69/86) 18ans	22.000	350	200	33.6	33.6	85	
3	Boughzoul (34/86) 53ans	20.500	11.7 33.0 *	83	6 20.3 *	22.3	21	*
4	Bou Hanifia (40/86) 47ans	7.000	73	137	21.4	21.4	59	
5	S.M.B.A (78/86) 9ans	4.890	235	120	225.6	9.4	213	
6	Cheurfas (70 ans)	4.150	18	62	6.0	12.0	41	
7	K'Sob (40/86) 51 ans	1.310	11.6	50	12.2	12.2	198	
8	Bakhadda (36/86) 51ans	1.300	37.6 50.3 *	73	--- 45.1 *	8.1	122	*
9	Foum El Chersa (50/86) 37ans	1.280	47	21	26.5	20.5	433	
10	Beni Bahdels (40/86) 47ans	1.016	63	74	56.5	6.5	136	
11	Oued Fodda (53/86) 55ans	800	225	94	132.7	92.3	2098	
12	Ighil Emda (53/47) 22ans	625	154.8	175	119.9	34.9	2493	
13	La Cheffia (65/86) 22ans	575	175.68	140	168.4	7.3	573	
14	Zardesas (36/86) 51ans	345	14.9 27 *	53	--- 20.2 *	16.5	938	*
15	Sarno (54/74) 21ans	264	22	12	21.3	0.7	234	
16	Foum El Gueiss (39/86) 48 ans	156	3	12	1.6	1.4	187	
17	Hamiz I (1890/14) 25ans	139	14.6	54	12.31	2.05	590	
	Hamiz II (35/86) 51ans	139	21	54	16.4	4.6	649	
18	Meffrouch (36/86) 24ans	90	16	18	14.6	1.4	648	

Tab 1-4

*: Apres surélévation

CHAPITRE 2**Le transport solide:****Définition:**

L'érosion et le transport solide sont deux phénomènes qui se succèdent; une fois l'érosion déclenchée et en présence de l'eau, c'est le transport des particules qui se produit.

La dynamique des matériaux arrachés au sol et transportés par le réseau d'écoulement, dépend essentiellement de la vitesse d'écoulement et de la granulométrie.

Le champ d'exploitation des vitesses varie tout au long du profil de l'oued d'amont en aval. La capacité de charriage est liée à la nature granulométrique des matériaux, et varie dans le temps et dans l'espace avec le débit liquide.

Le transport solide se présente sous trois aspects différents qui sont:

2-1- Le transport solide:**2-1-1-Le transport de fond (charriage):**

Où les matériaux roulent ou glissent sur le fond sans jamais le quitter. Il concerne les gros éléments.

2-1-2-Le transport par suspension:

Qui concerne les éléments plus fins, ceux-ci sont entraînés par le courant sans toucher le fond.

2-1-3 Le transport par saltation:

Certains matériaux progressent par bonds successifs, se trouvant alors tantôt sur le fond, tantôt au sein du liquide.

IL n'existe aucune théorie à propos de la saltation, c'est pour cela qu'elle est considérée avec le charriage.

2-2- L'influence du régime turbulent d'un cours d'eau sur le transport solide:

Les fluctuations de vitesses de l'écoulement engendrées par l'existence d'un régime turbulent dans un cours d'eau font que les particules solides du fond du lit de l'oued soient arrachées, celles-ci alors, si elles sont d'un volume assez important, seront charriées sous l'action des fluctuations turbulentes, sinon elles seront transportées dans le courant toutes en étant en suspension grâce à cette turbulence toujours.

2-3- Quantification et prévision du transport solide:

Actuellement, plusieurs méthodes sont utilisées pour quantifier et prévoir les apports solides arrivant aux retenues. La plupart d'entre elles se fondent, directement ou indirectement sur les résultats des mesures, par prélèvement d'échantillons, ou la mesure des levées topographiques des retenues. Ces méthodes sont de trois types différentes, par fois combinées:

- 1- Méthodes empiriques;
- 2- Application des équations du transport solide;
- 3- Méthodes par modélisation.

2-3-1- Méthodes empiriques:

Elles consistent à prévoir les apports de sédiments à partir des relations empiriques découlant des mesures directes, établies au sein du système rivière - réservoir. Ceci se fait, soit en prélevant des échantillons de débits solides en suspension et au fond, concernant une station donnée, soit par des mesures de levées topographiques des retenues.

On utilise alors les données sur les apports de sédiments, obtenues par l'une des méthodes suscitées, afin de fournir une information sur le transport solide d'un bassin versant déterminé.

2-3-2 Application des équations du transport solide:

La mise au point de méthodes pour l'évaluation du transport solide demeure l'objectif fondamental de la recherche en sédimentologie. IL faut bien admettre qu'actuellement de telles méthodes n'existent qu'en théorie.

En pratique, il existe un certain nombre de formules qui, toutes, apportent bien une réponse mais dont aucune n'est assez sûre ni précise.

Les formules adaptées sont celles qui ont été retenues par le comité de sédimentation de la division hydraulique de l'A.S.C.E (société américaine des ingénieurs civils).

Chacune de ces formules, repose sur des hypothèses et des données bien précises, dans le but d'espérer une cohérence entre les résultats théoriques et ceux mesurés

directement dans la nature. Cependant ces formules restent non fiables, vue la difficulté de rassembler les éléments primordiaux du phénomène.

Les formules les plus importantes sont:

- Formule de DUBOYS (1879);
- Formule de MEYER PETER (1934);
- Formule de SCHOKLITSII (1935);
- Formule de SHIELDS (1936);
- Formule de MEYER-PETER-MULLER (1948);
- Formule de EINSTEIN-BROWN (1950);
- Formule de EINSTEIN (charriage) (1950);
- Formule de LAURSEN (1958);
- Formule de COLBY (1964);
- Formule de ENGELUND (1967);
- Formule de YALIN (1963 et 1970);

Il est à remarquer que la formule d'EINSTEIN permet le calcul du transport solide total, c'est à dire charriage et suspension.

2-3-3 Méthodes par modélisation:

On distingue deux modèles:

- Le modèle mathématique;
- Le modèle physique;

Actuellement, et avec tout ce que dispose le monde en matériels informatiques sophistiqués, les chercheurs se sont retournés contre la simulation en utilisant le modèle physique réduit, vue ses inconvénients (coût élevé, règles de similitudes limitées...etc.), et ils se sont penchés vers la modélisation mathématique, plus précisément la modélisation statistique, qui en se servant d'un ordinateur, et en ayant en mains toutes les données concernant l'étude du transport solide voulue, et en maîtrisant les lois auxquelles est soumis le phénomène, ils pourront alors arriver à cerner ce problème et le résoudre.

L'objectif de la modélisation mathématique de l'érosion des sols et de déterminer l'apport en sédiment d'un bassin versant en un temps donné.

2-4- Rappel de quelques formules de quantification et prevision des apports solides:

2-4-1- Formule de HENIN(1950):

$$E_s = \frac{I_p IS}{KV_e}$$

Où I_p : intensité des précipitations,

I : pente du bassin versant,

K : perméabilité,

S: susceptibilité des sols,

Ve: végétation.

2-4-2- Formule universelle de WISCHMEYER(1959):

Le service américain de conservation des sols, a mis au point une équation permettant la mesure des pertes de terre, subies par les sols. Cette équation est :

$$A = R(KL_s CP)$$

Avec : A: pertes de terres (T/ha),

R: indice d'agressivité de la pluie (T/ha),

K: indice de l'érosion du sol,

Ls: indice de pente,

P: indice- remède de conservation du sol.

Cette équation a été mise en application par ce même service en Amérique, elle a donné des résultats fructueux quant aux techniques anti érosives.

La même équation a été appliquée dans l'est de l'Algérie, pendant une courte durée d'expérimentation, et elle a montré la gravité du problème de l'érosion.

2-4-3-TIXERONT(1960):

En étudiant 32 bassins versants algériens et 9 bassins tunisiens, TIXERONT a pu tirer des conclusions assez importantes quant à l'influence de la pluie, la saison, la géomorphologie, la lithologie, le climat, et le couvert végétal, sur l'érosion et le transport solide. IL a ensuite proposé un modèle en corrélant l'apport moyen annuel et la perméabilité du bassin versant .

$$Q_s = aA^b$$

$$b=0.15$$

Avec:

A: lame d'eau ruisselée en mm/an,

a: coefficient de perméabilité du terrain variant de 8.5, pour les bassins perméables, à 3200 pour les imperméables.

2-4-4-SOGREAH(étude des aires d'irrigation Avril 1969):

En se basant sur les données d'observation recueillies au niveau de 9 barrages et 18 stations hydrométriques, SOGREAH a déduit que le ruissellement annuel de crue R et la perméabilité des bassins versants sont les facteurs essentiels des transports solides des oueds.

IL a englobé ses résultats sous forme d'une relation graphique :

$$A = \alpha R^\beta$$

Où A: dégradation spécifique en T/km²/an,

R: ruissellement annuel moyen en mm,

$\beta=0.15$,

α : paramètre empirique variant avec le degré de perméabilité des bassins; allant de 3.3 pour bassins à perméabilité élevée, à 3.2 pour les bassins imperméable.

2-4-5-DEMMAK 1982:

DEMMAK a mis en relief l'importance de cette érosion et toutes ses conséquences, et proposa une méthodologie d'étude et de lutte.

A cet effet, il a procédé à la sélection de 30 bassins versants de l'Algérie du nord, représentatifs de différentes conditions physique, géomorphologique, climatique et hydrologique.

Il a défini une corrélation multiple très significative, incluant plusieurs paramètres physiques pour un bassin versant côtier à forte érosion, qui ne s'est avérée valable que pour les bassins telliens ayant plus de 10% de marnes et une pluviométrie dépassant les 300 mm.

La relation proposée est de la forme:

$$T_{SS} (T/Km^2/an) = 26.62I_L + 5.07I_P + 9.77C_T - 593.56$$

Avec:

T_{SS} : Transport solide spécifique moyen annuel, exprimé en T/km²/an.

I_L : Indice lithologique = superficie des formations marneuses et argileuses du crétacé supérieur et la tertiaire, exprimée en pourcentage de la superficie totale du bassin.

I_P : Indice de précipitations érosives = produit du pourcentage des précipitations annuelles tombées sous forme de pluies supérieures à un seuil donné par la fréquence de ces précipitations.

Le seuil considéré est égal à 20mm pour les bassins imperméables ($I_L > 50\%$), et 30 mm pour les bassins moyennement perméables ($I_L < 50\%$).

C_T : Coefficient de torrentialité tel que :

$$C_T = D_d \cdot F_1 = \frac{\sum L_X}{A} \cdot \frac{N_1}{A}$$

D_d : Densité de drainage (longueur totale du réseau fluvial ramenée à l'unité de surface).

N_1 : Nombre des thalwegs élémentaires.

Cette relation empirique, élaborée à partir des données de 30 bassins versants, est statistiquement significative.

CHAPITRE 3

Mécanisme des sédiments dans les retenues:

Introduction:

L'érosion, le transport solide et l'envasement sont des phénomènes naturels qui coexistent depuis des millions d'années, voire, depuis la création de la terre.

Des quantités importantes de sédiments sont rejetées par les rivières et cours d'eau dans les mers et océans, où elles se décantent.

L'installation d'aménagement hydraulique tels que les barrages sur une section du cours d'eau, dénature les phénomènes suscités, et donc au lieu que les sédiments soient rejetés dans les mers, ils seront plutôt rejetés dans les retenues des barrages.

Le dépôt continu de ces quantités solides dans la cuvette du barrage fait que la capacité de celui-ci, initialement estimée, soit réduite, et donc sa durée de vie soit minime, ce qui n'est pas tolérable économiquement.

3-1- Mécanisme de l'envasement:

Le comportement et la distribution des sédiments dans les retenues est un phénomène très complexe dans le processus de l'envasement en raison de la multiplicité des types de retenues et les principaux facteurs qui peuvent influencer sur l'envasement.

3-2- Différent modes d'envasement:

Il existe trois modes d'envasement possibles des retenues.

3-2-1- Retenue envasée par « courant de densité »:

Les eaux d'un cours d'eau arrivant dans les eaux claires de la retenue, sont traînées dans la zone de remous, se débarrassant rapidement des particules grossières transportées en saltation et conservent les plus fines en suspension.

Si la retenue présente les conditions suivantes:

⇒ Les crues de l'oued principal transportent une quantité importante de sédiments (la densité peut varier de 1.04 à 1.2). Cette forte concentration se manifeste surtout pendant les mois de septembre et octobre, succédant ainsi à la période estivale pendant laquelle l'oued est à sec.

⇒ L'oued présente une forte pente (jusqu'à 18% à oued BERD d'IGHIL EMDA)

⇒ La forme géométrique de la retenue est de type « canal ».

Si ces conditions se trouvent réunies, alors les courants de densité se forment en tête de la retenue, dans la zone de remous, et se propagent sans difficultés dans le fond de la retenue et viennent s'accumuler dans la partie aval, en formant une "masse boueuse" surmontée par l'eau claire. Cette masse se consolidera peu à peu au cours du temps.

3-2-2 Retenue envasée par charriage des particules grossières et décantations des particules fines:

Si les conditions mentionnées ci-dessus ne sont pas réunies, à savoir la retenue qui prend la forme de type "lac". La faible concentration en éléments solides et la faible pente du lit de l'oued principal (écoulement fluvial), c'est le cas de la plupart des retenues importantes. Dans ce cas l'envasement se fait de la manière suivante: les eaux de la rivière arrivant dans les eaux claires de la retenue sont freinées dans la zone du remous. Là, elles perdent leurs matériaux grossiers, qui vont former un delta en queue de la retenue. Ce delta, de surface limitée mais de hauteur relativement grande, présente une pente raide (talus naturel des sédiments) à sa limite aval, plus douce à sa surface. IL s'étend en amont de la limite des eaux calmes en rehaussant les lignes d'eau à l'amont, et avance vers le barrage avec le temps, au fur et à mesure des apports.

Les sédiments fins sont tributaires de la gravité, de la turbulence et des écoulements dans la retenue. Les particules de taille argileuses (inférieure à 2μ) ont une vitesse de chute très faible à l'état individuel, qui les empêcherait de se sédimenter. Mais en général, la salinité des eaux lacustres est suffisante (0.5g/l), pour produire la floculation de ces particules. Les flocons ainsi formés, ont une vitesse de chute beaucoup plus importante et décantent aussi rapidement que les silts.

Une fois déposées au fond, les vases sont susceptibles de former des coulées boueuses vers les parties les plus basses de la retenue. Lorsqu'elles sont stabilisées, et en l'absence de mouvements importants dans la retenue, les dépôts vont se consolider en se débarrassant de leur eau interstitielle.

3-2-3- Retenue envasée par rouleaux de recirculation:

Les "petites" retenues sont beaucoup plus brassées, et les phénomènes ne sont pas aussi distincts.

Le classement granulométrique est moins net et l'envasement est plus uniforme sur toute la retenue.

Généralement pour ce type de retenue, les conditions de formation des courants de densité ne sont pas réunies et dans ce cas l'envasement se fait par rouleaux de recirculation. Cette étude très complexe a été réalisée sur le modèle réduit de la retenue du barrage de BENI-AMRANE de capacité de 16 Mm^3 .

COMPORTEMENT DES SEDIMENTS FINS

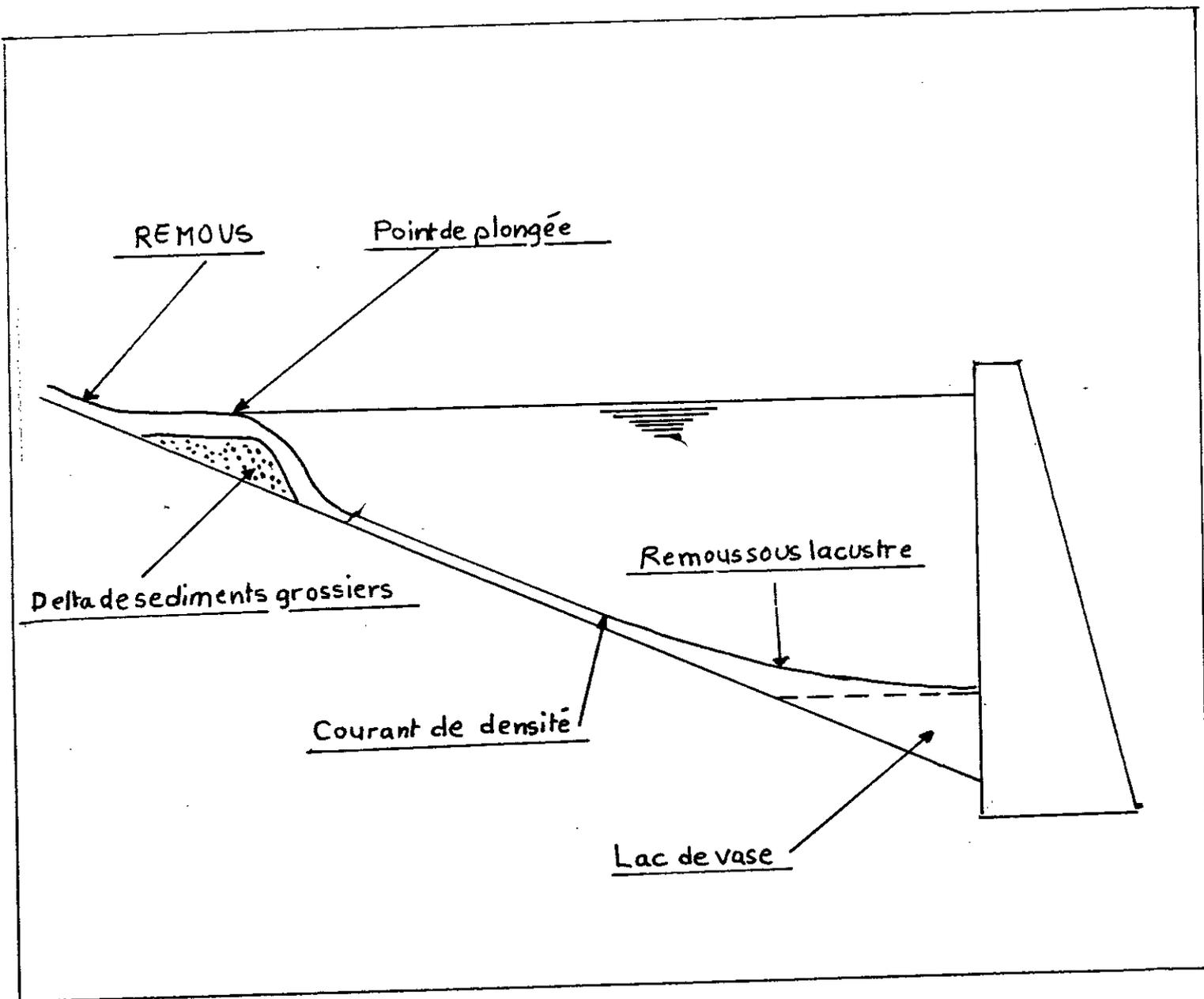
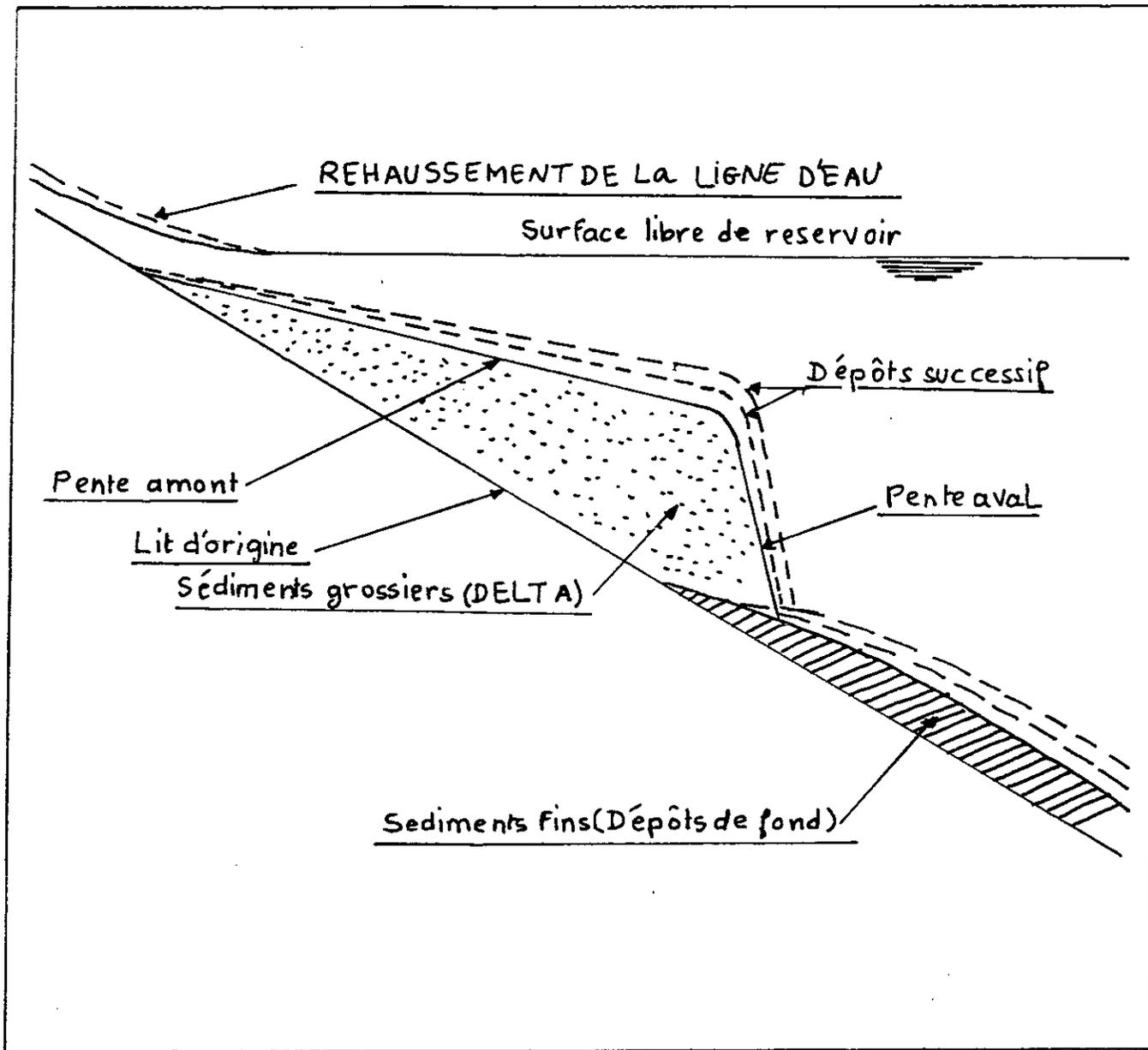


FIG. COMPORTEMENT DES SEDIMENTS GROSSIERS



CHAPITRE 4

Méthodes de défenses contre l'érosion et la sédimentation:

Introduction:

Vue les conséquences négatives engendrées par l'érosion accélérée des sols et la sédimentation, l'ingénieur hydraulicien est censé protéger l'ouvrage qu'il concevra avant même sa réalisation, et ceci en établissant un plan de défense contre ce problème chronique.

Plusieurs suggestions peuvent aider à éliminer, voire, minimiser le phénomène. On citera dans ce qui suit les plus importantes.

4-1-Dans les interfluves:

4-1-1- Procédés agrotechnique:

En choisissant les cultures adaptées au type des terres, en tenant compte de leur capacité à protéger le sol.

4-1-2- Restauration des forêts:

Elle reste le moyen le plus efficace de la conservation des sols. Les différents types de plantations que nous allons citer à présent, sont particulièrement les plus importants:

1. Ceinture forestière sur les terres agricoles pour régulariser le ruissellement, améliorer l'infiltration et protéger contre l'érosion éolienne.
2. Bandes de forêts et bouquets d'arbres à l'intérieur du réseau hydrographique, le long des ravins pentus et des vallées soumises à une forte érosion.

Les ceintures forestières protègent les sols de différentes façons. Elles réduisent la vitesse du vent et améliorent le microclimat. Ces ceintures sont très efficaces lorsqu'elles sont disposées perpendiculairement au ruissellement, (le long des courbes de niveau), l'écoulement peut alors être dispersé et l'infiltration favorisée.

Ce pendant, une mauvaise disposition des ceintures forestières peut être la cause d'une intensification du ruissellement et de la formation de nouvelles rigoles.

4-1-3- Procédés hydrotechniques:

IL concernent certains types de structures, et ne sont utilisés que lorsque cela est justifié économiquement, ou si les autres procédés sont révélés non efficaces.

Ces procédés comprennent les fossés d'infiltration, les barrages de rétention avec de grandes surfaces de retenue, et les terrasses le long des courbes de niveau, etc....

4-2- Dans les cours d'eau:

L'érosion du réseau hydrographique est souvent la cause de difficultés et de pertes financières, de ce fait, il est nécessaire de rechercher des moyens de protection contre l'érosion.

4-2-1- Revêtement des berges:

Le mode de protection des berges est généralement la mise en place d'un revêtement de protection fabriqué à l'aide de matériaux résistants à l'érosion tels que les enrochements, le béton, ou recouvert d'une couche végétale, et disposé directement sur le talus de la berge.

4-2-2- Freinage de l'écoulement:

En plaçant des structures perméables parallèlement à la base des berges. La diminution locale de la vitesse réduit les risques d'érosion et facilite, lorsque les conditions sont favorables, le dépôts des sédiments et la croissance de végétation le long de la berge.

4-2-3- Aménagement hydraulique:

Les barrages et les autres ouvrages hydrauliques sont souvent de très grande taille, nécessitant alors la maîtrise des débits très élevés sous une forte charge.

On doit mettre en place des dispositifs efficaces pour dissiper l'énergie des écoulements à grande vitesse et pour empêcher les affouillements indésirables du lit à l'aval de l'ouvrage.

On utilise couramment les dispositifs suivants:

- ◆ Bassin de dissipation d'énergie.
- ◆ Sauts de ski

PARTIE 2

CHAPITRE 1**Rappels théoriques de la statistique:****Introduction:**

L'étude d'échantillons aléatoires d'une population, permet d'établir certaines conclusions valides à propos de cette dernière. Cependant, une population est définie par sa fonction de distribution, caractérisée par ses paramètres (μ , σ , ...etc.).

1-1- La réduction des données:

Les séries statistiques peuvent être caractérisées par leurs paramètres ou valeurs typiques, qui sont:

1-1-1- Paramètres de position:

Qui servent à caractériser l'ordre de grandeur des observations . On définit particulièrement:

- **La moyenne arithmétique:**

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$$

Avec:

\bar{X} : moyenne arithmétique,

x_1, \dots, x_n : variables aléatoires de l'échantillon de taille n.

1-1-2- Paramètres de dispersion:

Qui permettent de chiffrer la variabilité des valeurs observées autour d'un paramètre de position. Ce sont principalement:

- **La variance:**

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n}$$

Où: S^2 : la variance;

n: taille de l'échantillon;

X_1, \dots, X_n : variables aléatoires de l'échantillon de taille n;

\bar{X} : moyenne arithmétique.

- **L'écart type:**

N'est autre que la racine carrée de la variance

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n}}$$

• **Le coefficient de variation**

$$C_v = \frac{S}{\bar{X}}$$

Avec C_v : coefficient de variation,

S : l'écart type et \bar{X} : la moyenne arithmétique.

Le coefficient de variation permet de comparer la variabilité relative de plusieurs séries statistiques dont les ordres de grandeur sont très différents.

• **La covariance:**

Dans le cas de séries statistiques à deux dimensions X et Y, et en plus des paramètres définis ci-dessus, nous définissons une autre grandeur qui est la covariance.

Celle-ci caractérise simultanément les deux séries d'observation.

$$COV(X,Y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})$$

1-2- Estimation des paramètres d'une population par l'intervalle de confiance:

A partir de la moyenne \bar{X} d'un échantillon, on peut estimer la moyenne μ de la population, en rajoutant à \bar{X} une certaine quantité dite erreur standard.

a) Echantillons étendus ($n \geq 30$):

En fixant l'erreur à α , on peut donc déterminer un intervalle de confiance $[\bar{X}_{\alpha/2}, \bar{X}_{1-\alpha/2}]$ contenant μ à un niveau de confiance de $(1-\alpha)$. Cet intervalle est défini alors par :

$$\bar{X} \pm U_{1-\frac{\alpha}{2}} \left(\frac{S}{\sqrt{n}} \right)$$

\bar{X} : moyenne de l'échantillon,

$U_{1-\frac{\alpha}{2}}$: variable normale centrée réduite.

$\frac{S}{\sqrt{n}}$: erreur standard.

b) Petits échantillons (n < 30) "Test de STUDENT"

Dans ce cas, nous utilisons la distribution de STUDENT.

$$\bar{X} \pm t_{1-\frac{\alpha}{2}} \left(\frac{S}{\sqrt{n}} \right)$$

$t_{1-\frac{\alpha}{2}}$: variable déterminée dans le tableau de STUDENT pour une erreur α et un degré de liberté $v=n-1$.

1-3- Estimation de la variance et de l'écart type:

La meilleure estimation de la variance σ^2 d'une population est donnée par la variance S^2 d'un échantillon aléatoire et simple, extrait de cette population.

Selon la taille de l'échantillon, on distingue les deux cas suivant:

a) n ≤ 100:

Pour cela, on effectue le test de KHI-DEUX χ^2 :

$$\chi_{\alpha/2}^2 \leq \frac{nS^2}{\sigma^2} \leq \chi_{1-\alpha/2}^2 \quad \dots(1)$$

Avec: χ^2 : variable déterminée dans le tableau Khi-deux pour une erreur α et un degré de liberté $v=n-1$.

De l'équation (1), il résulte que l'écart type σ peut être considéré comme compris dans l'intervalle:

$$\frac{S\sqrt{n}}{\chi_{1-\alpha/2}} \leq \sigma \leq \frac{S\sqrt{n}}{\chi_{\alpha/2}}$$

b) n ≥ 100:

Pour cela, on effectue:

$$\sigma \pm U_{1-\alpha/2} \frac{S}{\sqrt{2n}}$$

Avec $U_{1-\alpha/2}$: variable normale centrée réduite pour une erreur α .

CHAPITRE 2Tests statistiques:2-1- Test d'indépendance et de stationnarité:

L'indépendance signifie qu'il n'existe aucune interaction, ni influence entre les observations.

La stationnarité signifie que les séries de données sont invariantes en respectant l'échelle du temps.

Ces deux tests ont été regroupés sous une seule expression établie par WALD et WOLFORWITZ (1943) (Test W-W), dont voici le principe:

Soit un échantillon de taille n . Le test de W-W considère une statistique R telle que:

$$R = \sum_{i=1}^{n-1} X_i X_{i+1} + X_1 X_n$$

Si les éléments de l'échantillon sont indépendants alors, R suit une loi normale de moyenne \bar{R} et de variance $\text{var}(R)$ telle que:

$$\bar{R} = (S_1^2 - S_2)/(n-1)$$

$$\text{VAR}(R) = \frac{(S_2^2 - S_4)}{n-1} - \bar{R}^2 + \frac{(S_1^4 - 4S_1^2 S_3 + S_2^2 - 2S_4)}{(n-1)(n-2)}$$

$$S_j = \sum (X_i - \bar{X})^j$$

La quantité $U = (R - \bar{R}) / (\sqrt{\text{VAR}(R)})$ suit la distribution normale standard $N(0,1)$, et peut être utilisée pour tester l'hypothèse d'indépendance au niveau α , en comparant $|U|$ avec le déviateur $U_{\alpha/2}$ de la $N(0,1)$ correspondant à la probabilité de dépassement $\alpha/2$.

Si $|U| < U_{\alpha/2}$ alors l'hypothèse d'indépendance est acceptée à $\alpha\%$ du niveau de signification. (Généralement on choisit $\alpha=5\%$ d'où $U_{2.5}=1.96$).

2-2- Test d'homogénéité et de stationnarité:

L'homogénéité implique que tous les éléments de l'échantillon sont originaires d'une même population. Des changements dans les procédés de mesure peuvent rendre les données non homogènes.

Ce test, proposé par MANN et WHITNEY (1947) (test M-W) consiste à partager la série à contrôler en deux sous échantillons de taille P et Q ($P \leq Q$).

L'échantillon combiné de taille $n=P+Q$ est rangé dans l'ordre croissant.

Ce test considère les quantités :

$$V=R-P(P+1)/2$$

$$W=PQ-V$$

Avec R: somme des rangs des éléments du premier échantillon (P), pris dans la série combinée.

$$R=\sum_{i=1}^{p-1} X_i X_{i+1} + X_1 X_p \quad i=1, p-1.$$

V et W sont obtenus à partir de R, P, et Q.

La statistique U du test (M-W) est définie par le minimum de V et W;

$$U=\min(V, W).$$

On pose comme condition $n > 30$ et $P, Q > 3$.

Si les deux échantillons proviennent de la même population alors U suit une loi normale de moyenne U et de variance $\text{var}(U)$.

$$U=PQ/2$$

$$\text{var}(U)=|PQ/n(n-1)|[(n^3-n)/12- \sum T]$$

$$\text{Avec } T=(J^3-J)/12$$

Où J: est le nombre d'observations liés au rang donné, pour les deux échantillons P, Q. Pour un test de degré de signification α , la quantité $|U| = |(U-U)/\sqrt{\text{var}(U)}|$ est comparée à la variable $U_{\alpha/2}$ de la loi normale $N(0,1)$ correspondant à la probabilité au dépassement $\alpha/2$.

Si $|U| < \alpha/2$ alors le test d'homogénéité à $\alpha\%$ du niveau de signification est accepté.

2-3- Réflexion de la réalité:

Ce test consiste à éliminer les observations invraisemblables qui apparaissent non réelles. La présence de ces points dans un échantillon nuit beaucoup quant à l'ajustement de la loi théorique. Que se soit des valeurs très basses ou très hautes, ces valeurs ont un impact sur l'analyse de notre échantillon.

Ce test élaboré par SEVRUK et GEIGER (1981), (test S-G) est basé sur l'hypothèse que les logarithmes des valeurs de l'échantillon, sont normalement distribués.

Afin d'appliquer le test (S-G), deux quantités sont calculées:

$$X_H = e^{(X+Kn S)}$$

$$X_L = e^{(X-Kn S)}$$

Avec X et S sont respectivement la moyenne et l'écart type du logarithme naturel de l'échantillon.

K_n est la statistique de (G-S) tablée pour différentes tailles d'échantillons et pour divers niveaux de signification.

Pour un degré de signification égale à 10%, K_n est estimé par la formule de PILTON et AL (1985):

$$K_n = -0.362201 + 6.28446 n^{1/4} - 2.49835 n^{1/2} + 0.491436 n^{3/4} - 0.037911 n$$

Avec n : taille de l'échantillon.

Toute valeur supérieure à X_H , ou inférieure à X_L est considérée comme singulière.

CHAPITRE 3

La régression:

Introduction:

Le transport solide reste jusqu'à présent un phénomène complexe dont on ignore précisément le mécanisme. Il rentre dans le cadre de l'hydraulique fluviale qui devient de plus en plus une partie de la mécanique; mécanique très complexe puisqu'elle concerne les sols plus ou moins fluidisés par l'action d'un écoulement liquide (phénomène soumis aux lois multiples de la mécanique des sols et celle des fluides).

De ce fait, une modélisation mathématique reste difficile à concevoir, cependant l'information statistique est disponible sur des durées assez importantes pour permettre des corrélations entre les variables plus ou moins évidentes.

3-1- Ajustement de courbes:

En pratique, il arrive très souvent que l'on mette en évidence une relation entre deux ou plusieurs variables, et que l'on souhaite exprimer cette relation sous forme mathématique en déterminant une équation qui relie ces variables.

Une première étape consiste à recueillir les données correspondant aux différentes variables.

L'étape suivante consiste à représenter graphiquement les points des variables aléatoires X et Y dans un système de coordonnées cartésiennes. L'ensemble de ces points est souvent appelé un diagramme de dispersion.

D'après les données du diagramme de dispersion, il est souvent possible de mettre en évidence une courbe continue qui suit approximativement les données. Une telle courbe est appelée courbe d'ajustement.

Le problème général de trouver des équations d'approximation des courbes qui permettent d'exprimer des données est celui de l'ajustement des courbes. Pratiquement le type d'équation est souvent suggéré par le diagramme de dispersion.

Parfois, il est intéressant de construire les diagrammes en fonction de variables transformées.

3-2- La régression :

Un des objets de l'ajustement des courbes est d'obtenir l'expression de l'une des variables (la variable dépendante) en fonction de l'autre (la variable indépendante), (liaison stochastique). Cette opération d'estimation s'appelle souvent une régression.

Si Y peut être estimée en fonction de X par l'intermédiaire d'une équation quelconque, celle-ci est dite alors équation de Y en X. Elle est de la forme $Y = E(Y/X) + \varepsilon$.

Où:

$E(Y/X)$: Espérance conditionnelle de Y en X.

ε : est un résidu caractérisant les fluctuations aléatoires (bruits résultants des variations aléatoires de variables incontrôlables).

La courbe correspondante est la courbe de régression de Y en X.

3-2-1- Types de régression :

a) La régression linéaire:

Ce cas, le plus important dans la pratique est celui où :

$$E(Y/X) = \alpha + \beta X$$

D'où la courbe de régression est :

$$Y = \alpha + \beta X + \varepsilon$$

Avec ε est une variable d'espérance nulle et de variance S^2 .

b) Transformation des variables:

De nombreuses relations non linéaires peuvent se ramener facilement au cas linéaire par des transformations simples. Les relations suivantes peuvent être linéarisées comme suit:

Equation	$Y^* =$	$X^* =$	Equation transformée
$Y = \alpha X^\beta$	$\log(Y)$	$\log(X)$	$Y^* = \log(\alpha) + \beta X^*$
$Y = \alpha e^{\beta X}$	$\log(Y)$	X	$Y^* = \log(\alpha) + \beta X$
$Y = \alpha + \beta \log(X)$	Y	$\log(X)$	$Y = \alpha + \beta X^*$

3-3- La modélisation:

Considérons un couple de variables aléatoires (X, Y).

Lorsque l'on peut admettre que le phénomène aléatoire représenté par X peut servir à prédire celui représenté par Y , on est conduit à rechercher alors une formule de prévision de Y par X du type :

$$Y = f(X) + \varepsilon,$$

ainsi qu'à évaluer l'ordre de grandeur de l'erreur de prévision ε (ε : bruits résultants des variations aléatoires des variables incontrôlables).

La formule de prévision idéale sera déterminée par la méthode des moindres carrés, elle présentera alors le modèle adéquat au phénomène étudié, dont le comportement est décrit par les données statistiques.

3-4- Hypothèses du modèle:

Dans la population concernée pour l'étude, on admet:

$$Y_i = \alpha + \beta X_i + \varepsilon_i$$

$H_1:$	$E(\varepsilon_i) = 0$	$\forall i$
$H_2:$	$Var(\varepsilon_i) = S^2$	$\forall i$
	$E(\varepsilon_i \varepsilon_j) = 0$	$\forall i \neq j$
$H_3:$	$\varepsilon_i \sim N(0, S)$	$\forall i$

3-5- Avantage d'un modèle:

- Parmi les avantages d'un modèle :
- L'exploitation des données expérimentales;
- La réduction de l'ensemble des données au nombre de paramètres du modèle, tout en gardant l'information contenue dans les données;
- La simulation du comportement du système;
- L'exploitation des conséquences logiques des hypothèses;
- L'amélioration de la conception de la réalité.

3-6- Estimation des paramètres du modèle (α, β, σ^2):

Tout modèle pouvant s'écrire sous la forme de :

$$Y = A + BX$$

où pouvant se ramener à la forme suscitée, par un changement de variable simple est dit modèle linéaire.

L'estimation des paramètres du modèle se fait par la méthode des moindres carrés, qui reprend sur l'échantillon la propriété:

$$E(Y|X) = \alpha + \beta X$$

comme étant la meilleure approximation de Y en X.

On cherche donc à ajuster au nuage de points (X_i, Y_i) une droite d'équation: $Y^* = A + BX$ de telle sorte que $\sum (Y_i - Y_i^*)^2$ soit minimal.

La méthode élémentaire de détermination de A et B est la suivante:

$$\sum (Y_i - Y_i^*)^2 = \sum (Y_i - A - BX_i)^2 = F(A, B)$$

Ce minimum est atteint pour

$$\frac{\partial F}{\partial A} = \frac{\partial F}{\partial B} = 0$$

ce qui donne les deux équations:

$$\begin{aligned} \sum (Y_i - A - BX_i) &= 0 \\ \sum X_i (Y_i - A - BX_i) &= 0 \end{aligned}$$

dont la solution est :

$$B = \frac{\sum (Y_i - \bar{Y})(X_i - \bar{X})}{\sum (X_i - \bar{X})^2} = R \frac{S_Y}{S_X} = \frac{\text{Cov}(X, Y)}{S_X^2}$$

$$A = \bar{Y} - B\bar{X}$$

On peut écrire alors :

$$Y^* = \bar{Y} + R \frac{S_Y}{S_X} (X - \bar{X})$$

ou encore :

$$Y^* = \bar{Y} + \frac{\text{cov}(X, Y)}{S_X^2} (X - \bar{X})$$

Pour estimer $S^2 = V(\epsilon)$, on utilise la variance des résidus $e_i = (Y_i - Y_i^*)$, c'est à dire la quantité minimisée:

$$\sum (Y_i - Y_i^*)^2$$

Nous trouverons alors :

$$S^2 = \frac{\sum (Y_i - Y_i^*)^2}{n-2} = \frac{n}{n-2} (1-R^2) S_Y^2$$

Avec

$S_{Y/X}^2 = (1-R^2) S_Y^2$: la variance résiduelle.

Remarque:

Les quantités A, B, et S^2 sont des estimations sans biais de α , β , et σ^2 . On définit alors les intervalles de confiance de α et β comme suit:

Nous avons les variances de A et B définies :

$$S_A^2 = \left[\frac{1}{n} + \frac{\bar{X}}{\sum_i (X_i - \bar{X})^2} \right] S^2 = S^2 \left(\frac{1}{n} + \frac{\bar{X}^2}{n S_X^2} \right)$$

$$S_B^2 = \frac{S^2}{\sum_i (X_i - \bar{X})^2} = \frac{S^2}{n S_X^2}$$

et les variables:

$$\frac{A - \alpha}{S_A} \text{ et } \frac{B - \beta}{S_B}$$

suivent une loi de Student à $v=n-2$ degré de liberté

$$\text{D'où: } A - t_{(1-\alpha/2, n-2)} S_A \leq \alpha \leq A + t_{(1-\alpha/2, n-2)} S_A$$

$$B - t_{(1-\alpha/2, n-2)} S_B \leq \beta \leq B + t_{(1-\alpha/2, n-2)} S_B$$

3-7- Le coefficient de corrélation:

Le coefficient de corrélation, R, est précisément le rapport de la variance au produit des écarts types des variables X et Y.

$$R = \frac{\text{cov}(X, Y)}{S_X S_Y}$$

Avec : $-1 \leq R \leq 1$

Le carré du coefficient de corrélation R, qui est égal à R^2 , n'est autre que le coefficient de détermination.

3-8- Corrélation et causalité:

Afin d'éviter toute interprétation abusive, il ne faut pas perdre de vue que l'existence d'une corrélation même élevée entre deux séries d'observation, n'implique pas nécessairement l'existence d'une relation de cause à effet entre les deux variables considérées.

Pour cela, l'estimation de R reste insuffisante quant à la décision de la validité du modèle. De ce fait, le test de corrélation est indispensable.

3-9- Test de corrélation:

Les propriétés de la méthode des moindres carrés dépendent essentiellement du fait que le résidu ε a une variance constante quelque soit X, et qu'il n'y a pas d'autocorrelation entre les diverses réalisations de ε .

Le test de corrélation linéaire, qui n'a de sens que si X et Y sont aléatoires, consiste à comparer la statistique :

$$F = \frac{R^2}{1-R^2}(n-2)$$

qui est une variable aléatoire de FISHER-SNEDECOR à $v_1=1$ et $v_2=n-2$ degrés de liberté, à la statistique $F_\alpha(1,n-2)$, obtenue de la table de FISHER-SNEDECOR, pour un risque d'erreur α .

Le test est satisfaisant lorsque :

$$F > F_\alpha(1,n-2)$$

3-10- Intervalle de prédiction:

A partir de l'équation de la droite de régression, et connaissant X_i on peut déterminer Y_i .

En fixant l'erreur à α , on peut donc déterminer un intervalle contenant Y_i , à un niveau de confiance de $(1-\alpha)$. L'intervalle est défini par la formule suivante:

$$Y_i \pm \frac{t_{1-\frac{\alpha}{2}}}{\sqrt{n-2}} S_r \sqrt{(1-R^2) \left[n+1 + \frac{n(X_i - \bar{X})^2}{S_x^2} \right]}$$

Où t : est une variable déterminée dans le tableau de STUDENT pour une erreur α et un degré de liberté $v = n-1$.

Notons que pour les grandes valeurs de n , les limites de confiances de la population théorique sont données par :

$$Y_i \pm U_{1-\frac{\alpha}{2}} \sqrt{S_{Y|X}^2}$$

Où :

$U_{1-\frac{\alpha}{2}}$: est une variable normale centrée réduite pour une erreur α .

On prend généralement $\alpha = 5\%$.

$S_{Y|X}^2$: La variance résiduelle déjà définie.

CHAPITRE 4Courbes des débits classés:Introduction:

Quand le nombre de valeurs observées distinctes est élevé, il est souvent nécessaire de condenser encore les tableaux statistiques, en groupant les observations en classes ou en catégories. On obtient ainsi des distributions de fréquences groupées en classes.

Ce type de distributions est particulièrement utile lorsqu'on dispose d'un grand nombre de données relatives à une variable continue dont les valeurs observées sont très proches les unes des autres.

Chaque classe est généralement caractérisée par ses valeurs limites.

L'écart entre les limites des classes est dit amplitude.

Lorsque cet intervalle est constant, chacune des classes peut également être caractérisée par son point médian.

La fréquence d'une classe est le nombre d'observations qui y sont contenues sur le nombre d'observation total de l'échantillon.

4-1- Répartition de la statistique d'observations en classes:

En général, le nombre de classes est donné par la formule suivante:

$$K = \langle \log_2(n) \rangle + 1$$

Avec:

n: taille de l'échantillon;

$\langle x \rangle$: partie entière de x;

$$\log_2(n) = \frac{\ln(n)}{\ln(2)}$$

L'amplitude des classes est donnée par :

$$H = \frac{\max(X_i) - \min(X_i)}{K}$$

On classe les débits X_i observés, par groupes: tout les débits compris entre X_i et X_i+H , seront de nombre effectif n_i . On obtient ainsi K rectangles juxtaposés de même largeur H et de hauteurs différentes f_i , avec:

$f_i = n_i / n$: probabilité pour qu'un débit soit constaté entre X_i , et X_i+H .

On peut schématiser ceci comme suit:

Nous avons d'abord le tableau des fréquences :

Classe	Effectif	Fréquences	Fréquences cumulées
$[X_1, X_1+H]$	n_1	f_1	f_1
$[X_k, X_{k+1}]$	n_k	f_k	$\sum_{i=1}^k f_i$

La courbe des fréquences cumulées représentant les débits classés s'obtient de la manière suivante:

On peut présenter les X_i en fonction des fréquences sous forme d'histogramme.

Si l'on relie les points centraux de chaque rectangle de fréquence, on obtient alors la courbe des débits classés, comme l'indique la figure ci-dessous. (Fig. 4.1.1 - 4.1.2)

4-2- Estimation des apports solides en suspension :

L'estimation de la masse des sédiments en suspension se fait en plusieurs étapes:

- Diviser la courbe des fréquences cumulées des débits liquides en plusieurs intervalles de fréquences $[f_i, f_{i+1}]$.
- Calculer les débits liquides atteints ou dépassés Q_i correspondant à la médiane de chaque intervalle de fréquence.
- Pour chaque débit liquide, on calcule le débit solide en suspension en utilisant le modèle statistique élaboré:

$$Q_s = f(Q_L)$$

- Evaluer le débit solide en suspension par :

$$Q_s = \sum [Q_{si}(f_{i+1} - f_i)]$$

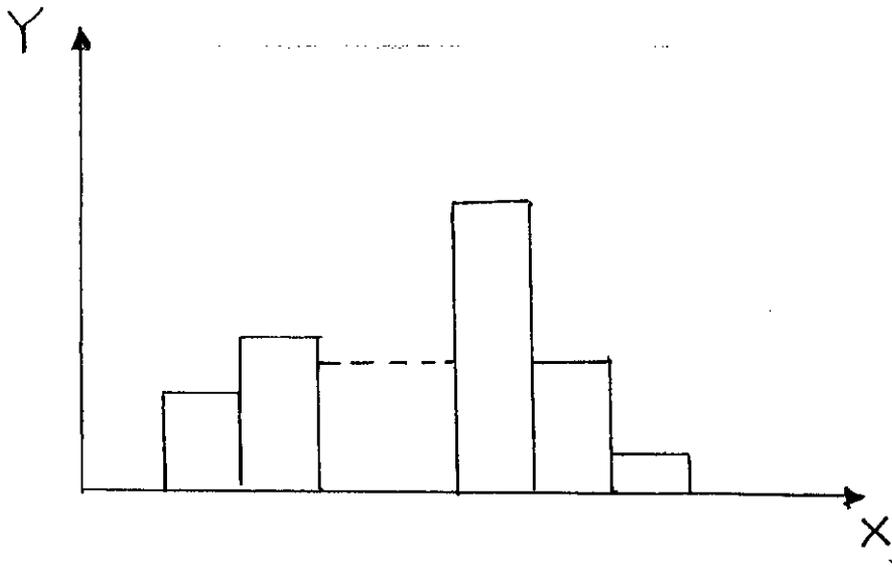


FIG. 4.1.1 Histogramme.

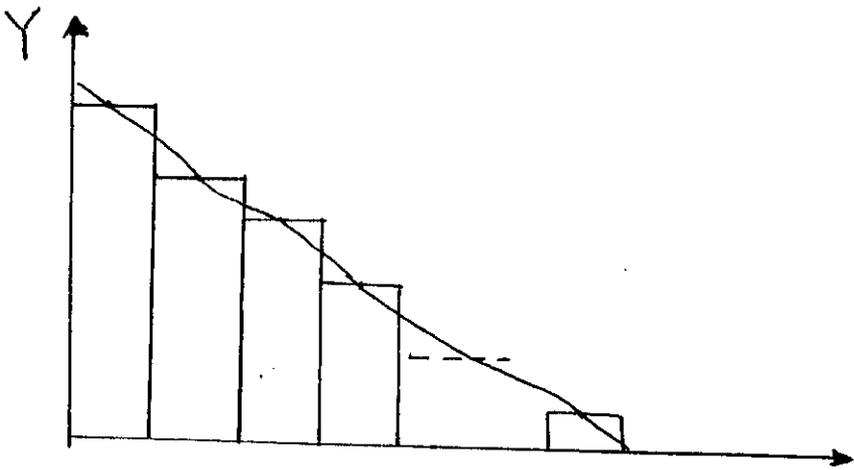
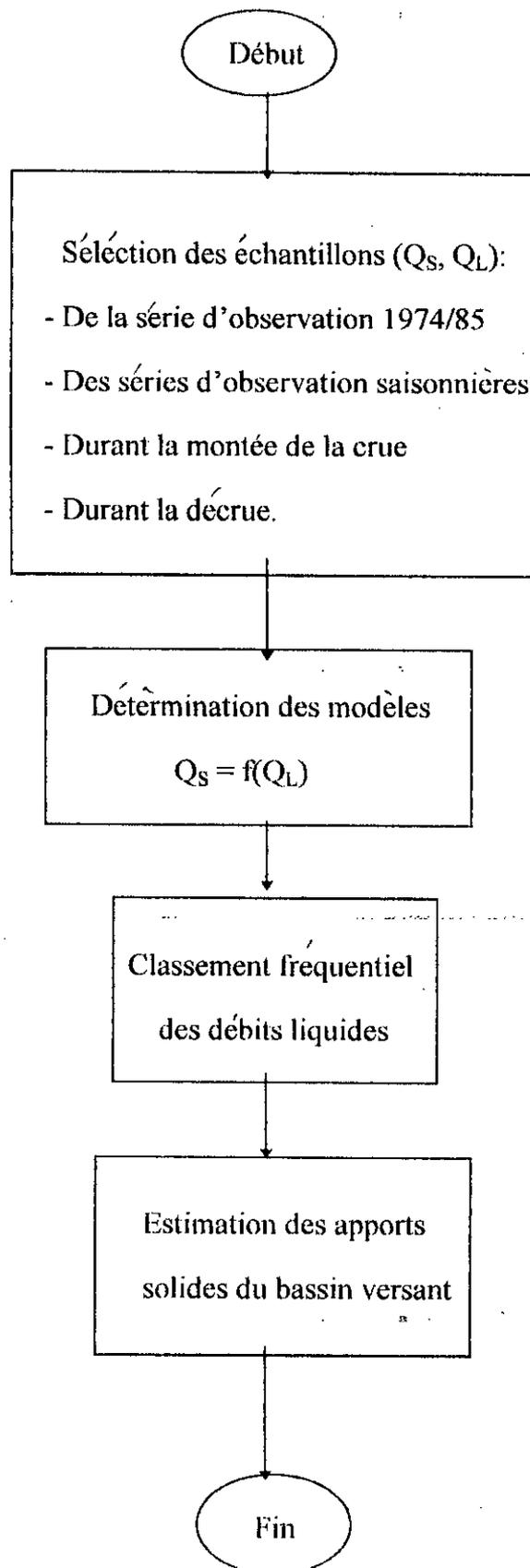
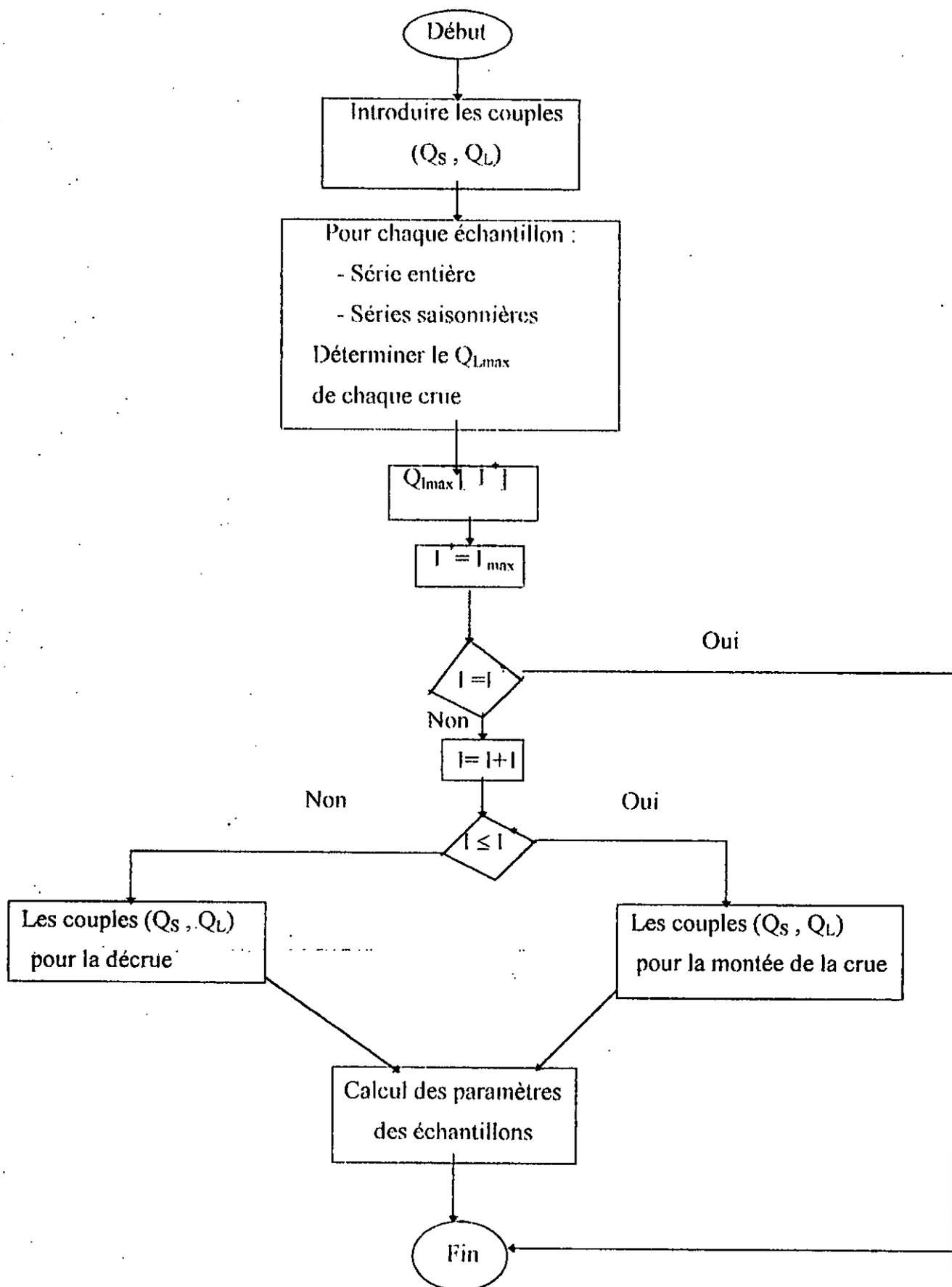
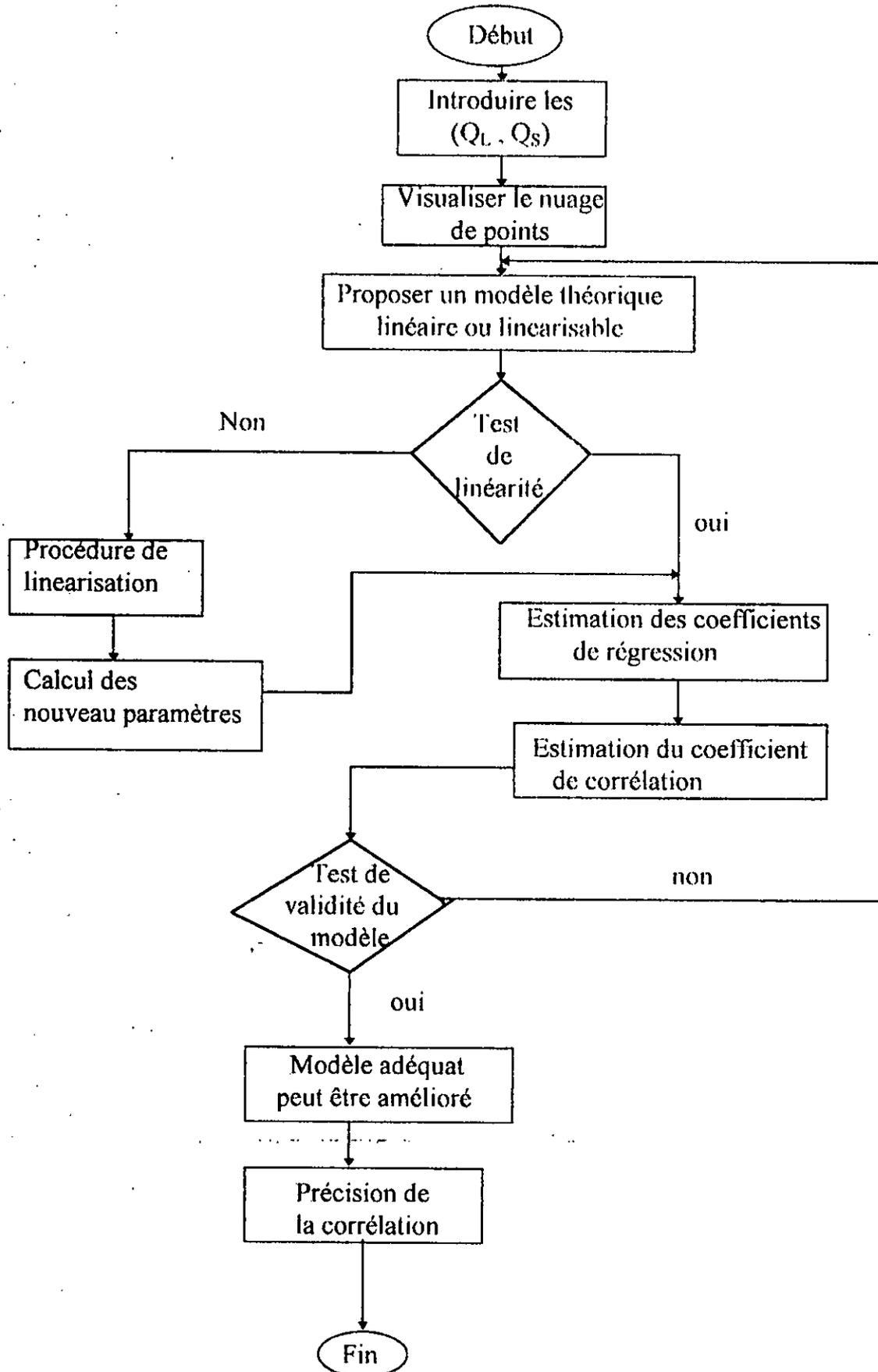
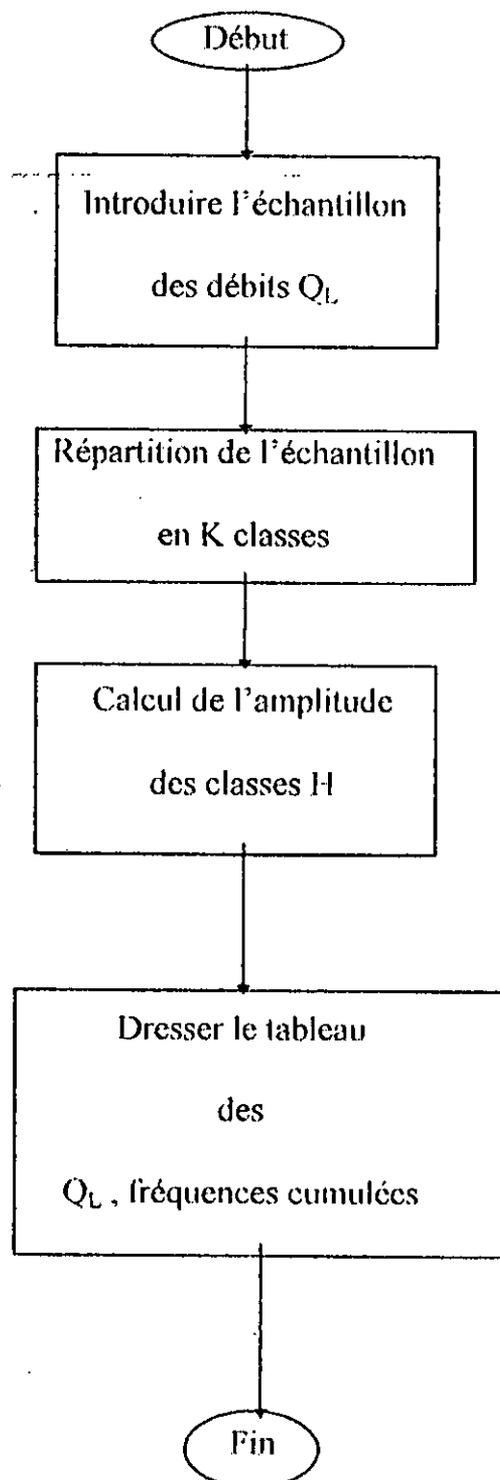


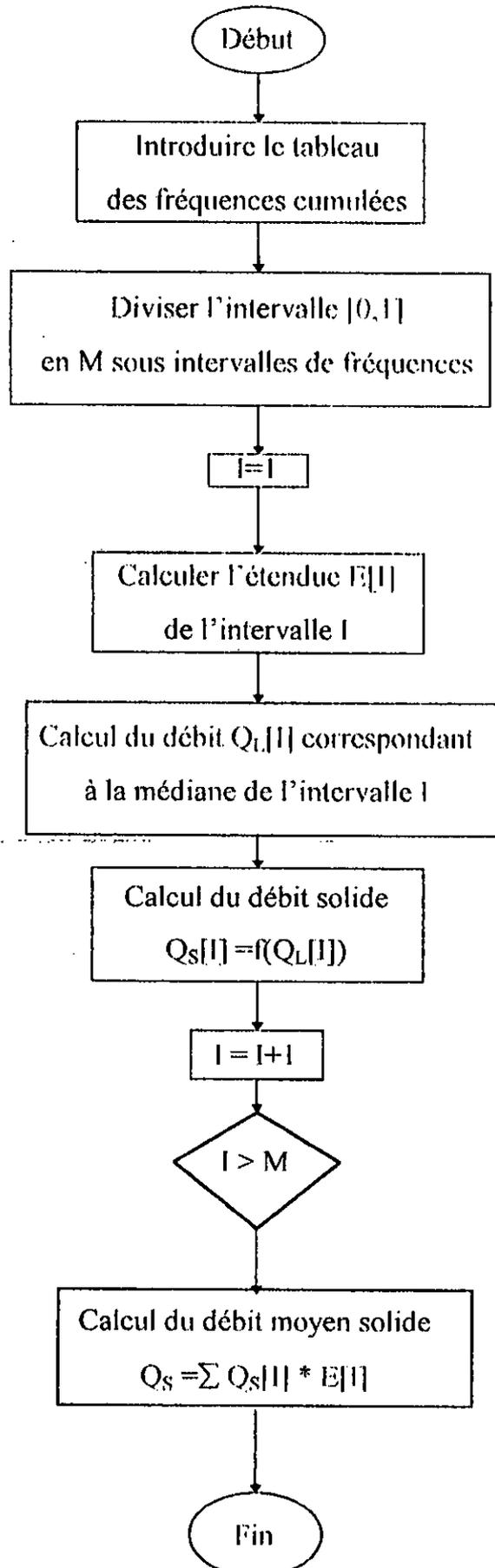
FIG. 4.1.2 Diagramme de fréquences cumuléés

5-1-Organigramme principal:

5-2-Organigramme de la sélection des échantillons:

5-3- Organigramme de la détermination du modèle:

5-4-Organigramme de l'étude fréquentielle des débits:

5-5- Organigramme d'estimation des apports solides:

PARTIE 3

ANALYSE DES RESULTATSIntroduction:

Le bassin de l'oued Isser limité à la station hydrométrique de LAKHIDARIA a été choisi pour servir de base à cette étude en raison de ses caractéristiques physico-climatiques représentatives de la zone tellienne très érodable.

Le régime climatique du bassin est marqué par une tendance semi-aride, avec une diminution des précipitations du nord au sud, passant de 800 mm dans la zone nord tellienne à 400 mm dans la région de Souaghi.

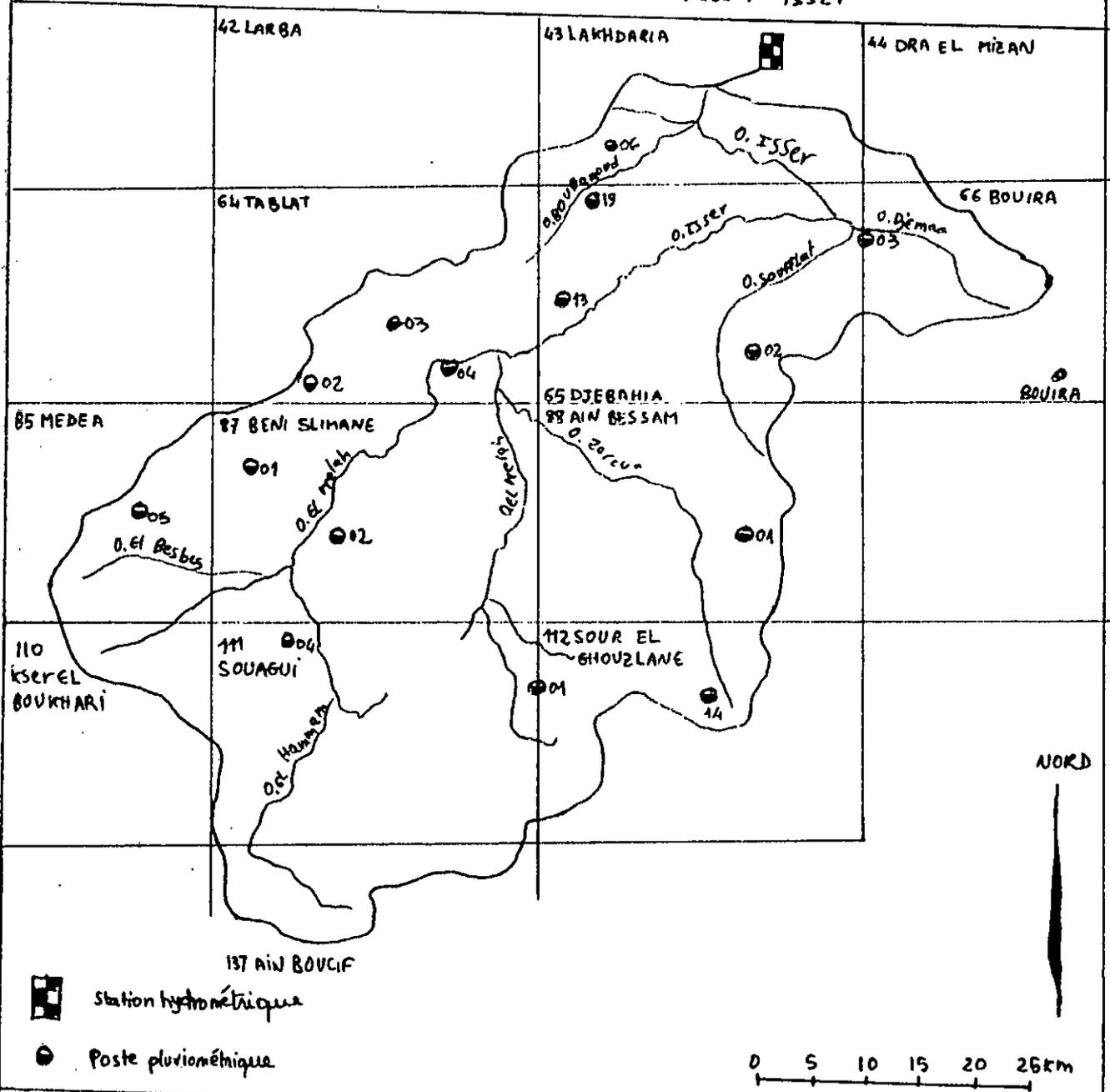
Les principales caractéristiques géomorphologiques de la station LAKHIDARIA sont présentées dans le tableau ci-dessous:

Oued	Isser
Surface	3615 km ²
Périmètre	270 km
Longueur du talweg	200 km
Longueur du rectangle équivalent	98.2 km
Altitude maximale	1810 m
Altitude minimale	90 m
Altitude moyenne	750 m
Indice de compacité	1.26
Indice de pente	0.11
Densité de drainage	3.6 km/km ²
Coefficient de torrentialité	29.5

Station: LAKHDARIA

Code : 09-05-01

Oued : Isser



DONNÉES MORPHOMÉTRIQUES

X : 579.10
Y : 369.75
Altitude minima (m) : 90
Altitude maxima (m) : 1810
Altitude moyenne (m) : 710
Surface (km²) : 3615
Périmètre (km) : 270

Longueur du rectangle équivalent (km) : 98.2
Longueur du thalweg principal (km) : 200
Densité de drainage (km/km²) : 36
Indice de compacité : 1.26
Indice de pente de Roche : 0.11
Coefficient de torrentialité : 29.5

1- Données disponibles:

Nous disposons à la station de LAKHDARIA, en amont du barrage de BENI-AMRANE, d'une série de débits de crues qui s'étale de 1954/58 et de 1965/66 jusqu'à 1993/94, soit 33 années en totale.

A partir de cette série, nous avons tiré un échantillon de telle manière que les concentrations en matières solides soient disponibles. Nous avons abouti alors à un échantillon de 11 années, allant de 1974 jusqu'à 1985. A partir delà, nous avons sélectionné les plus importantes crues qui se sont produites pendant cette période, donc, on a trouvé 32 crues.

2- Présentation des données brutes:

Les données recueillies au niveau de l'A.N.R.H, sont présentées dans des fiches d'analyse des eaux. Celles-ci contiennent les résultats concernant la hauteur d'eau dans l'oued (à la station de jaugeage), et ceux de l'analyse d'échantillon d'eau au niveau du laboratoire (concentration en matières solides, composition en sels dissous,... etc.).

L'heure et la date des prélèvement étant aussi mentionnées.

Les mesures s'effectuent quotidiennement, et lorsqu'il s'agit de crue, les agents de l'A.N.R.H amplifient les mesures (plusieurs fois par jour).

3- Constitution des fichiers de données:

Une fois l'échantillon de l'étude choisi, et les crues sélectionnées, nous devons transformer les hauteurs d'eau en débits (m³/s), et cela en utilisant des barèmes d'étalonnage. Il est à remarquer que les hauteurs d'eau mesurées à la station hydrométrique de LAKHDARIA, sont des hauteurs inclinées, car la station de jaugeage est incorporée dans le barrage de BENI-AMRANE. Donc nous étions obligés de multiplier toutes les hauteurs par l'angle d'inclinaison {cos α =0.81}.

Nous avons ensuite fait la saisie des données sur ordinateur, en introduisant les crues une à une, sous la forme suivante:

N# de la crue	La date	L'heure	Débit liquide	Concentration
---------------	---------	---------	---------------	---------------

Un petit programme a permis de calculer les débits solides en effectuant l'opération suivante:

$$\text{Débit solide(kg/s)} = \text{Débit liquide (m}^3\text{/s)} * \text{concentration (g/l)}$$

Sachant que les mesures au niveau de la station se faisaient en des temps irréguliers, nous avons dû alors estimer les valeurs manquantes pour chaque crue, et sur un intervalle de temps horaire.

Nous avons donc tracé la courbe des débits liquides et celle des débits solides, pour chaque crue, sur un même graphe, et nous avons ensuite effectué le dépouillement à pas de temps régulier d'une heure.

4- Répartition de l'échantillon d'étude en sous échantillons:

L'échantillon total obtenu après estimation des valeurs manquantes est de 6914 couples de données (Q_L, Q_S). De là nous avons séparé la montée de la crue de la décrue, pour la série entière. Les caractéristiques de l'échantillon sont données dans le tableau (Tab 4-1).

Série d'observation de 1974 à 1985			
	Total	Montée de la crue	La décrue
n	6914	2092	4822
\bar{Q}_L (m ³ /s)	91.27 ± 2.61	129.80 ± 5.96	74.55 ± 2.57
\bar{Q}_S (kg/s)	2202.93 ± 157.39	4195.71 ± 435.08	1338.37 ± 115.45
S_{QL} (m ³ /s)	110.82 ± 1.84	139.13 ± 4.22	91.04 ± 1.82
S_{QS} (kg/s)	6677.12 ± 111.29	10153.20 ± 307.65	4090.48 ± 81.63
C_{vQL}	1.21	1.07	1.22
C_{vQS}	3.03	2.42	3.05

Tab 4-1

Ensuite, nous avons sélectionné les crues selon la saison, donc, nous avons obtenu pour chaque saison (automne, hiver, printemps, été) des séries de données correspondant, tout en distinguant toujours la montée de la crue de la décrue.

Les tableaux (Tab 4-2, Tab 4-3, Tab 4-4, et Tab 4-5) permettent de visualiser les caractéristiques de ces échantillons.

Automne

	Total	Montée de la crue	La décrue
n	1347	466	881
\bar{Q}_L (m ³ /s)	74.58± 4.55	109.69± 8.71	56.01± 4.78
\bar{Q}_s (kg/s)	4724.78± 664.94	8846.95± 1720.53	2544.38± 425.44
\bar{S}_{QL} (m ³ /s)	85.18± 3.22	95.88± 6.15	72.35± 3.38
\bar{S}_{QS} (kg/s)	12451.18± 470.18	18538.43± 1190.20	6442.73± 300.83
C_{vql}	1.14	0.87	1.29
C_{vqs}	2.63	2.09	2.53

Tab 4-2

Hiver

	Total	Montée de la crue	La décrue
n	3397	1263	2134
\bar{Q}_L (m ³ /s)	94.66± 3.06	122.72± 5.28	78.05 ± 3.55
\bar{Q}_s (kg/s)	1232.40± 37.07	2076.47± 148.28	732.84± 67.96
\bar{S}_{QL} (m ³ /s)	91.04± 2.16	95.73± 3.73	83.84± 2.52
\bar{S}_{QS} (kg/s)	2172.90± 51.66	2688.77± 81.47	1601.86± 48.05
C_{vql}	0.96	0.78	1.07
C_{vqs}	1.76	1.29	2.18

Tab 4-3

PARTIE 3

ANALYSE DES RESULTATS

Printemps

	Total	Montée de la crue	La décrue
n	2084	331	1753
\bar{Q}_L (m3/s)	96.48 ± 6.39	188.99 ± 28.46	79.02 ± 4.97
\bar{Q}_S (kg/s)	1530.27 ± 160.44	4299.18 ± 736.52	1007.45 ± 115.19
S_{QL} (m3/s)	149.01 ± 4.53	264.21 ± 20.13	106.28 ± 3.52
S_{QS} (kg/s)	3736.92 ± 113.45	6836.68 ± 520.80	2460.67 ± 81.45
C_{vql}	1.54	1.39	1.34
C_{vqs}	2.44	1.59	2.44

Tab 4-4

Eté

	Total	Montée de la crue	La décrue
n	86	32	54
\bar{Q}_L (m3/s)	92.36± 11.08	89.41± 15.92	94.11± 14.89
\bar{Q}_S (kg/s)	17339.68± 3370.44	19035.49± 5512.88	16334.76± 4236.38
S_{QL} (m3/s)	52.44± 7.84	45.96± 11.26	55.85± 1.01
S_{QS} (kg/s)	15947.02± 2383.26	15911.01± 3898.19	15883.12± 2995.57
C_{vql}	0.56	0.51	0.59
C_{vqs}	0.92	0.83	0.97

Tab 4-5

Avec:

n : taille de l'échantillon,

\bar{Q} : la moyenne,

S : l'écart type,

C_v : le coefficient de variation.

IL est à noter que les coefficient de variation C_v sont généralement supérieurs à 1 d'où le caractère irrégulier des crues sélectionnées.

5- Analyse des crues:

Les crues observées à la station de LAKHDARIA et ayant fait l'objet d'un examen, ont été toutes représentées graphiquement.

La figure (FIG. 5-1) montre la forme générale des hydrogrammes et solidigrammes du bassin de l'Isser. Les conclusions que l'on peut tirer sont les suivantes:

- Le caractère complexe de ces crues: crues avec plusieurs pointes; parfois des trains de crues.
- Le temps de base dépasse généralement les 20 heures et peut parfois atteindre plusieurs jours, selon la crue et son importance.
- Le temps de montée est relativement court.
- Le temps de décrue est plus prolongé.
- Les plus forts débits sont observés au courant de la saison humide :Décembre, Janvier, Février et Mars.
- Le débit liquide maximal ne correspond pas au débit solide maximal. Ainsi, des volumes petits peuvent entraîner des quantités importantes en sédiments.

On note cependant que à partir de 73/74, on n'enregistre plus des crues supérieures à 1000 m³/s, la crue survenue au mois de Mars 1974 a été estimée à 2520m³/s. Selon une étude de l'A.N.R.H, cette crue correspond à une fréquence de période de retour de 50 ans, cette date a marqué en fait l'amorce d'une période de sécheresse qui sévit jusqu'à ce jour.

6- La modélisation:

La représentation graphique des nuages de points des échantillons étudiés, et la proposition à chaque fois d'une courbe de tendance (linéaire, logarithmique, puissance, exponentielle), ont permis la décision du choix du modèle. Celui-ci est justifié, une fois de plus par le coefficient de corrélation, "R", le plus élevé. (Cf. FIG. 6-1 et FIG. 6-2).

Donc, à partir des quatre modèles proposés, cités ci-dessus, nous avons opté pour le modèle en puissance, de la forme :

$$Q_s = A Q_l^B$$

linearisable en passant par le logarithme décimal:

$$\log(Q_s) = \log(A) + B \log(Q_l)$$

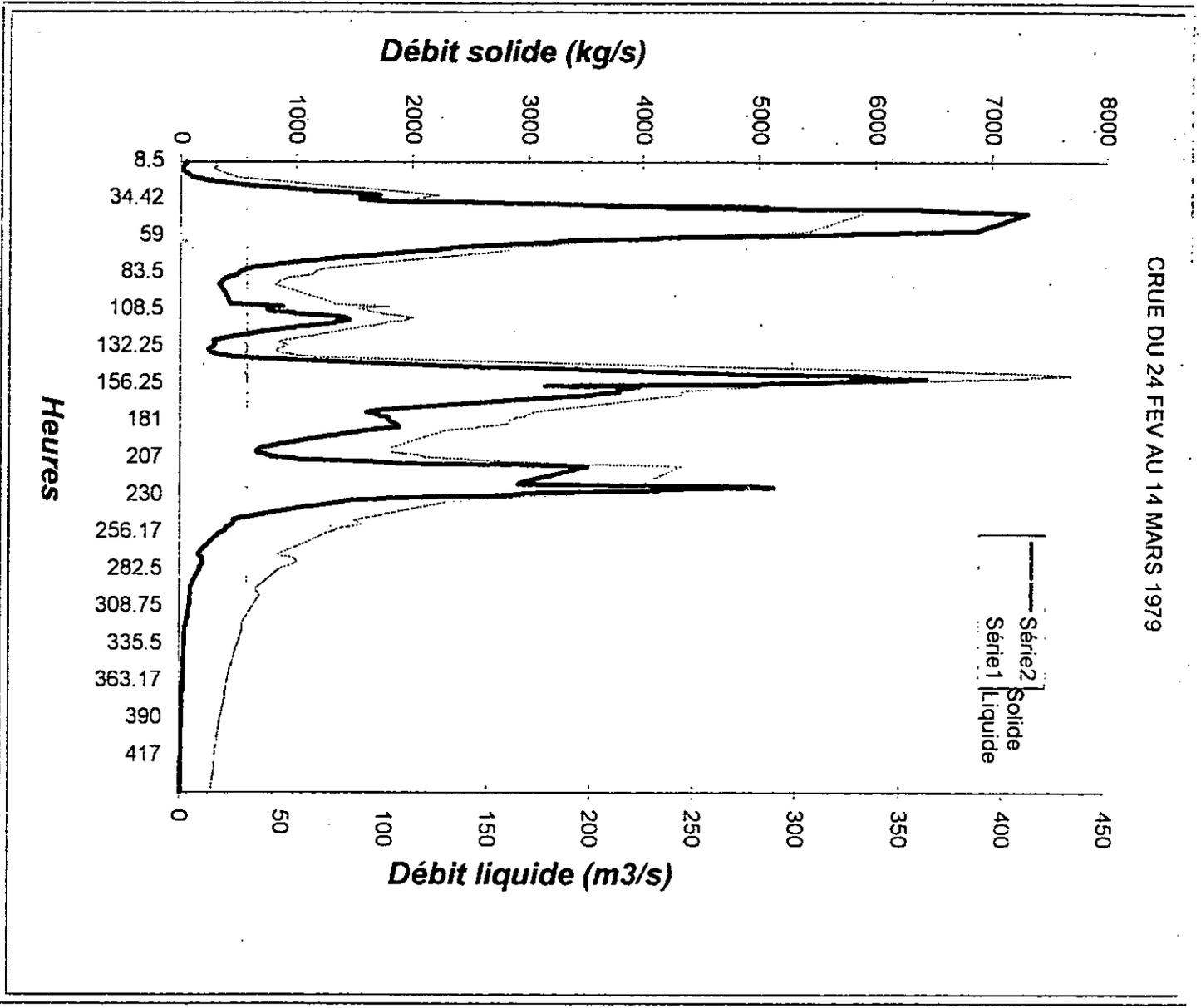


FIG 5-1

LA VARIATION DES DÉBITS
 LIQUIDE ET SOLIDE
 EN FONCTION DU TEMPS

Série de 1974 à 1985

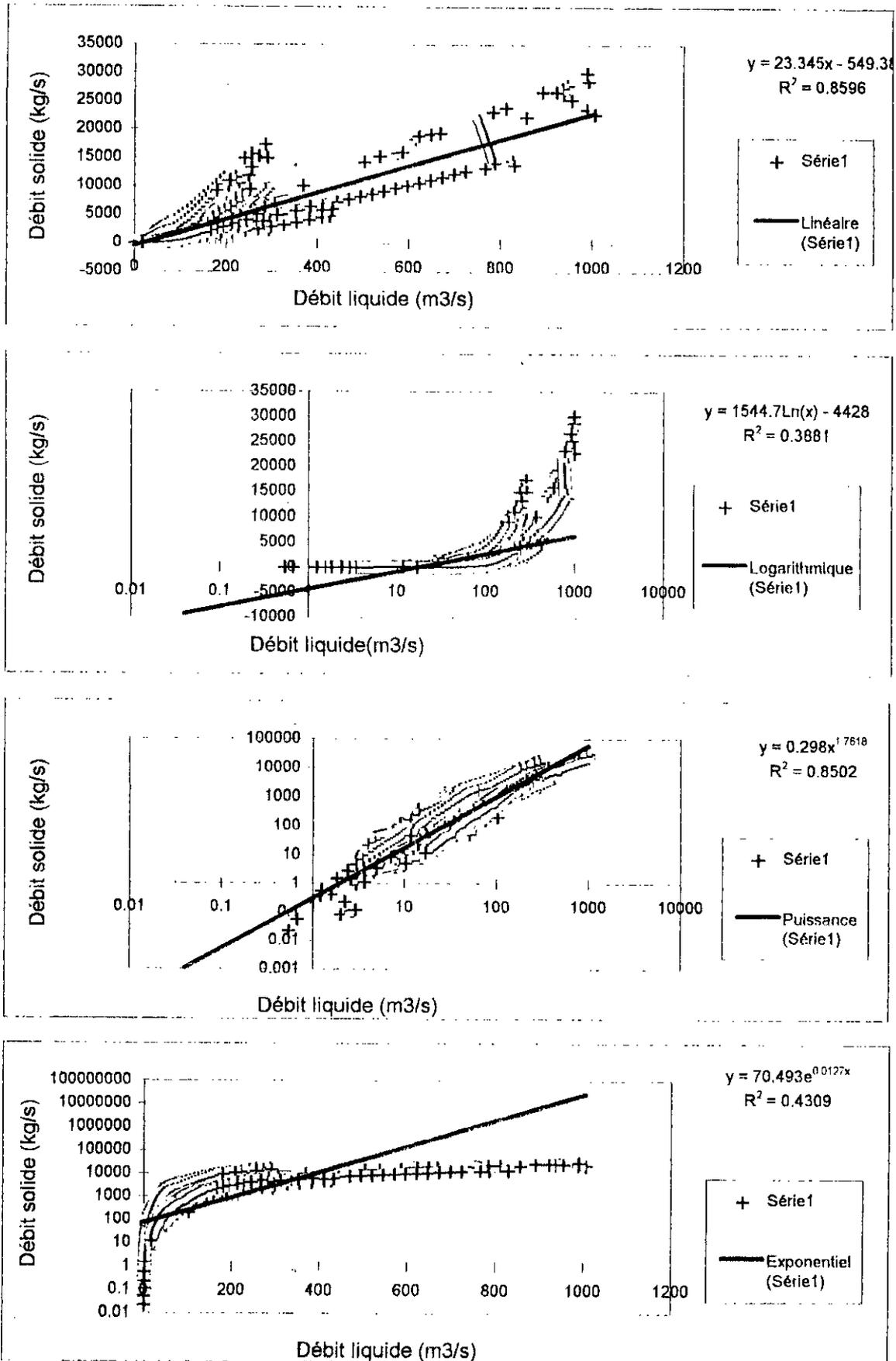
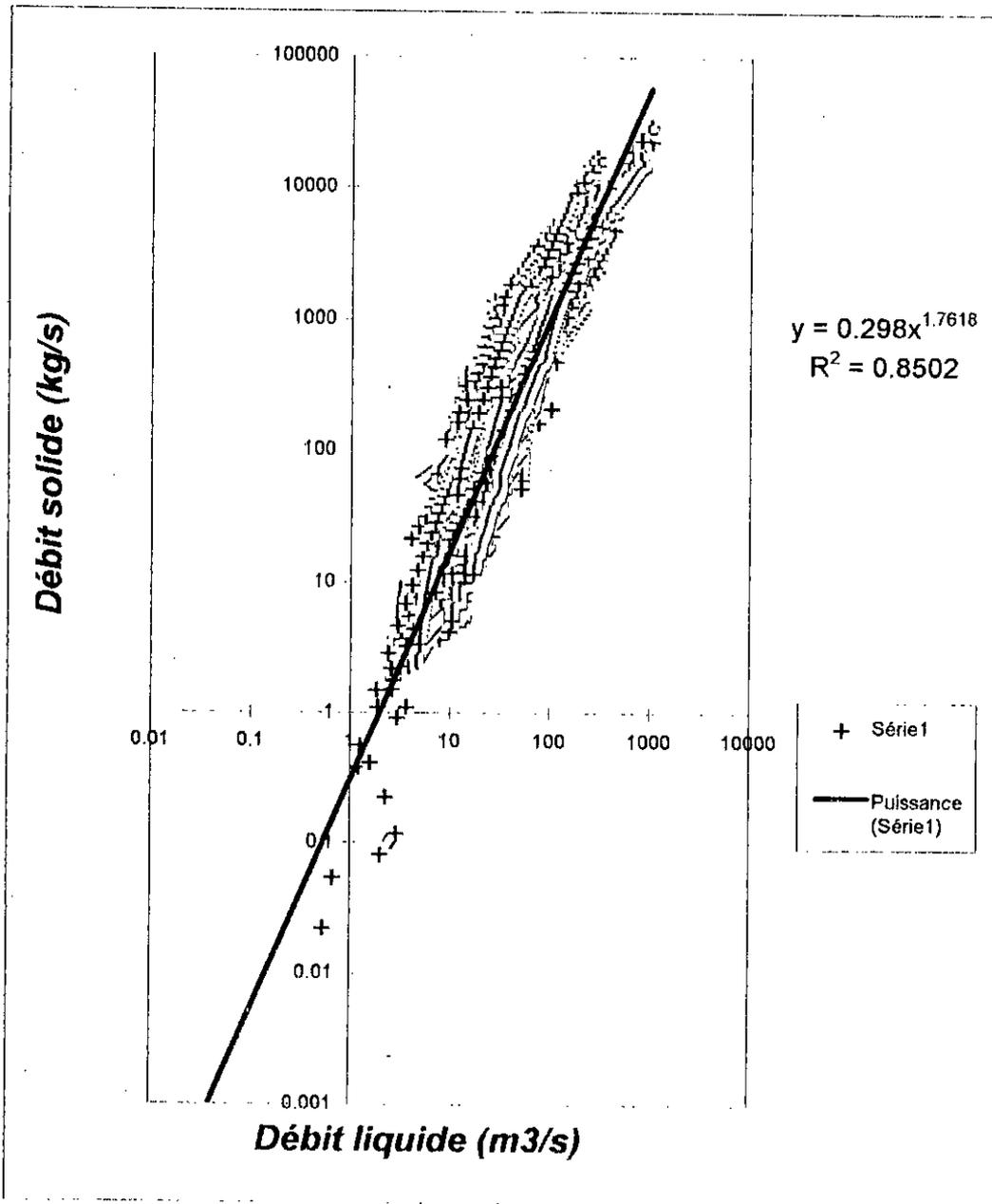


FIG. 6-1



DROITE DE REGRESSION DEBIT SOLIDE - DEBIT LIQUIDE
 BASSIN DE L'ISSER - STATION DE LAKADARIA (090501)
 FIG 6-2
 SERIE DE 1974 A 1985

PARTIE 3

ANALYSE DES RESULTATS

Les coefficients A et B sont déterminés par la méthode des moindres carrés.
Le tableau (Tab 6-1) indique les modèles de la période d'observation

Série d'observation de 1974 à 1985			
	Total	Montée de la crue	La décrue
A	0.298	0.321	0.2689
B	1.7618	1.8033	1.7793
R ²	0.8502	0.7941	0.7984
$Q_s = A Q_L^B$	$0.298 Q_L^{1.7618}$	$0.321 Q_L^{1.8033}$	$0.2689 Q_L^{1.7793}$

Tab 6-1

On constate bien que les coefficients de détermination, R², de la montée de la crue et de la décrue, sont très voisins.

Même procédés a été suivi pour la détermination des modèles saisonniers.

Les tableaux (Tab 6-2, Tab 6-3, Tab 6-4, Tab 6-5) englobent les résultats de ces modèles.

Automne			
	Total	Montée de la crue	La décrue
A	0.6001	0.3647	0.6787
B	1.8658	1.9865	1.8242
R ²	0.883	0.9089	0.8551
$Q_s = A Q_L^B$	$0.6001 Q_L^{1.8658}$	$0.3647 Q_L^{1.9865}$	$0.6787 Q_L^{1.8242}$

Tab 6-2

PARTIE 3

ANALYSE DES RESULTATS

Hiver

	Total	Montée de la crue	La décrue
A	0.1655	0.2514	0.1879
B	1.8188	1.7932	1.7396
R²	0.8506	0.8544	0.8437
$Q_s = A Q_L^B$	$0.1655 Q_L^{1.8188}$	$0.2514 Q_L^{1.7932}$	$0.1879 Q_L^{1.7396}$

Tab 6-3

Printemps

	Total	Montée de la crue	La décrue
A	0.2198	0.3011	0.2128
B	1.763	1.7266	1.7635
R²	0.8263	0.7939	0.8329
$Q_s = A Q_L^B$	$0.2198 Q_L^{1.763}$	$0.3011 Q_L^{1.7266}$	$0.2128 Q_L^{1.7635}$

Tab 6-4

Eté

	Total	Montée de la crue	La décrue
A	0.6958	0.0027	9.087
B	2.1881	3.4279	1.6188
R²	0.578	0.5742	0.98
$Q_s = A Q_L^B$	$0.6958 Q_L^{2.1881}$	$0.0027 Q_L^{3.4279}$	$9.087 Q_L^{1.6188}$

Tab 6-5

On constate la variation du degré de signification du coefficient de corrélation selon la saison.

N.B: Les modèles saisonniers sont représentés graphiquement dans l'Annexe I

7- Evaluation des intervalles de confiance des estimations A et B de α et β (coefficients de la droite de régression):

Tout estimation n'a de sens que lorsque celle-ci est justifiée par son intervalle de confiance. Ainsi, nous avons déterminé ces intervalles pour les paramètres A et B des modèles trouvés.

Les tableaux (Tab 7-1, Tab 7-2, Tab 7-3, Tab 7-4, Tab 7-5) résument les calculs.

Série d'observation de 1974 à 1985			
	Total	Montée de la crue	La décrue
n	6914	2092	4822
$\log(Q_s) = \log(A) + B \log(Q_t)$	$-0.52 + 1.7618 \log(Q_t)$	$-0.49 + 1.8033 \log(Q_t)$	$-0.57 + 1.7793 \log(Q_t)$
R²	0.8502	0.7941	0.7984
$\overline{\log(Q_t)}$	1.76	1.95	1.67
$\overline{\log(Q_s)}$	2.84	3.21	2.62
$S_{\log(Q_t)}^2$	0.39	0.33	0.39
$S_{\log(Q_s)}^2$	1.00805	0.84	1.01
$S_{(\log(Q_s) \log(Q_t))}^2$	0.15222	0.144	0.2075
S²	0.15226	0.144	0.2076
S_A^2	0.0001961	0.00085	0.00035
S_B^2	0.000056	0.00021	0.00011
$\pm \Delta(\log(A))$	0.0274	0.0573	0.0365
$\pm \Delta B$	0.0146	0.0282	0.0201

Tab 7-1

Avec:

$$\overline{\log(X)} = \frac{1}{2} \log\left(\frac{\overline{X^2}}{C_v^2 + 1}\right)$$

$$S_{\log(X)}^2 = \log\left(\frac{S^2}{\overline{X^2}} + 1\right) = \log(C_v^2 + 1)$$

$S_{\log Q_s / \log Q_l}^2$: la variance residuelle.

$$S^2 = \frac{\sum (Y_i - Y_i^*)}{n - 2} = \frac{n}{n - 1} S_{Y/X}^2 : \text{estimation de } \sigma^2$$

Donc : $\log(\alpha) \pm \Delta \log(A)$
 $\beta \pm \Delta B$

Automne			
	Total	Montée de la crue	La décrue
n	1347	466	881
$\log(Q_s) = \log(A) + B \log(Q_l)$	$-0.22 + 1.8658 \log(Q_l)$	$-0.44 + 1.9865 \log(Q_l)$	$-0.17 + 1.8242 \log(Q_l)$
R²	0.883	0.9089	0.8551
$\overline{\log(Q_l)}$	1.69	1.92	1.54
$\overline{\log(Q_s)}$	3.22	3.58	2.97
$S_{\log(Q_l)}^2$	0.36	0.25	0.426
$S_{\log(Q_s)}^2$	0.90	0.73	0.869
$S_{(\log(Q_s) / \log(Q_l))}^2$	0.0947	0.048	0.109
S²	0.0949	0.048	0.109
S_A^2	0.000626	0.00167	0.00081
S_B^2	0.000194	0.00042	0.00029
$\Delta(\log(A))$	0.0491	0.0801	0.0559
ΔB	0.0273	0.040	0.0334

Tab 7-2

PARTIE 3

ANALYSE DES RESULTATS

Hiver			
	Total	Montée de la crue	La décrue
n	3397	1263	2134
$\log(Q_s) = \log(A) + B \log(Q_L)$	$-0.78 + 1.8188 \log(Q_L)$	$-0.60 + 1.7932 \log(Q_L)$	$-0.73 + 1.7396 \log(Q_L)$
R²	0.8506	0.8544	0.8437
$\overline{\log(Q_L)}$	1.83	1.99	1.73
$\overline{\log(Q_s)}$	2.78	3.10	2.48
$S^2_{\log(Q_L)}$	0.28	0.21	0.33
$S^2_{\log(Q_s)}$	0.61	0.43	0.76
$S^2_{(\log(Q_s) \setminus \log(Q_L))}$	0.056	0.0266	0.0906
S²	0.056	0.0266	0.0907
S^2_A	0.00021	0.00042	0.000422
S^2_B	0.000058	0.00010	0.000127
$\Delta(\log(A))$	0.0285	0.0403	0.0403
ΔB	0.0149	0.0198	0.0221

Tab 7-3

Printemps			
	Total	Montée de la crue	La décrue
n	2084	331	1753
$\log(Q_s) = \log(A) + B \log(Q_t)$	$-0.66 + 1.763 \log(Q_t)$	$-0.52 + 1.7266 \log(Q_t)$	$-0.67 + 1.7635 \log(Q_t)$
R²	0.8263	0.7939	0.8329
$\overline{\log(Q_t)}$	1.72	2.04	1.67
$\overline{\log(Q_s)}$	2.76	3.36	2.58
$S_{\log(Q_t)}^2$	0.53	0.47	0.44
$S_{\log(Q_s)}^2$	0.84	0.54	0.84
$S_{(\log(Q_s)/\log(Q_t))}^2$	0.1233	0.0618	0.1187
S²	0.1235	0.0621	0.1188
S_A^2	0.00039	0.0018	0.00049
S_B^2	0.00011	0.00039	0.00015
$\Delta(\log(A))$	0.0387	0.0843	0.0434
ΔB	0.0207	0.0391	0.0241

Tab 7-4

Eté			
	Total	Montée de la crue	La décrue
n	86	32	54
$\log(Q_s) = \log(A) + B \log(Q_l)$	$-0.16 + 2.1881 \log(Q_l)$	$-2.57 + 3.4279 \log(Q_l)$	$0.95 + 1.6188 \log(Q_l)$
R²	0.578	0.5742	0.98
$\overline{\log(Q_l)}$	1.90	1.90	1.91
$\overline{\log(Q_s)}$	4.105	4.16	4.068
$S_{\log(Q_l)}^2$	0.12	0.10	0.13
$S_{\log(Q_s)}^2$	0.26	0.23	0.289
$S_{(\log(Q_s) \log(Q_l))}^2$	0.0299	0.0225	0.00167
S²	0.030	0.024	0.00173
S_A^2	0.0109	0.027	0.00092
S_B^2	0.00293	0.0074	0.00024
$\Delta(\log(A))$	0.208	0.324	0.059
ΔB	0.107	0.168	0.0305
Tab 7-5			

8- Validité des modèles:

Certes, les coefficients de détermination R^2 , obtenus pour le modèle en puissance, attribué à nos échantillons sont élevés, atteignant parfois 98%, excepté, dans le cas saisonnier où pendant l'été, nous avons trouvé des R^2 de l'ordre de 57%, alors que les régression linéaire et logarithmique ont abouti à des R^2 de l'ordre de 93% et 91%. Mais dans ce cas, on ne peut choisir ces deux modèles, vue que l'ensemble des autres échantillons suivent des modèles en puissance.

Le coefficient de détermination, seul, ne peut valider le modèle. Cependant un test de corrélation s'avère nécessaire.

Les tableaux (Tab 8-1, Tab 8-2, Tab 8-3, Tab 8-4, Tab 8-5) donnent le test effectué pour une erreur $\alpha=5\%$.

Série d'observation de 1974 à 1985

	Total	Montée de la crue	La décrue
n	6914	2092	4822
R^2	0.8502	0.7941	0.7984
$F = R^2 (n-2)/(1 - R^2)$	26334.75	7962.91	15007.23
$F_{\alpha}(1, n-2)$	3.84	3.84	3.84

Tab 8-1

Automne

	Total	Montée de la crue	La décrue
n	1347	466	881
R^2	0.883	0.9089	0.8551
$F = R^2 (n-2)/(1 - R^2)$	10209.98	4294.97	4843.65
$F_{\alpha}(1, n-2)$	3.84	3.8618	3.852

Tab 8-2

PARTIE 3

ANALYSE DES RESULTATS

Hiver

	Total	Montée de la crue	La décrue
n	3397	1263	2134
R²	0.8506	0.8544	0.8437
F= R²(n-2)/(1- R²)	18707.86	6948.63	11748.21
F_α (1, n-2)	3.84	3.84	3.84

Tab 8-3

Printemps

	Total	Montée de la crue	La décrue
n	2084	331	1753
R²	0.8263	0.7939	0.8329
F= R²(n-2)/(1- R²)	10029.69	1253.49	8435.15
F_α (1, n-2)	3.84	3.868	3.84

Tab 8-4

Été

	Total	Montée de la crue	La décrue
n	86	32	54
R²	0.578	0.5742	0.98
F= R²(n-2)/(1- R²)	114.86	38.57	2561.06
F_α (1, n-2)	3.956	4.17	4.026

Tab 8-5

Donc, sachant que les variables de débits liquides et solides sont aléatoires, nous avons obtenu pour tous les échantillons étudiés :

$$F \gg F_{\alpha} (1, n-2)$$

On conclut alors que les modèles trouvés sont adéquats.

9- Les intervalles de prédiction:

Les tableaux (Tab 9-1, Tab 9-2, Tab 9-3, Tab 9-4, Tab 9-5) indiquent les intervalles de prédiction de tous les modèles trouvés:

Série d'observation de 1974 à 1985

	Total	Montée de la crue	La décrue
$Q_s = A Q_L^B$	$Q_s = 0.298 Q_L^{1.7618}$	$Q_s = 0.321 Q_L^{1.8033}$	$Q_s = 0.2689 Q_L^{1.7793}$
$\log(Q_s) = \log(A) + B \log(Q_L)$	$-0.52 + 1.7618 \log(Q_L)$	$-0.49 + 1.8033 \log(Q_L)$	$-0.57 + 1.7793 \log(Q_L)$
$\log(Q_s) \pm \Delta(\log(Q_s))$	$\log(Q_s) \pm 0.765$	$\log(Q_s) \pm 0.743$	$\log(Q_s) \pm 0.893$

Tab 9-1

Automne

	Total	Montée de la crue	La décrue
$Q_s = A Q_L^B$	$Q_s = 0.6001 Q_L^{1.8658}$	$Q_s = 0.3647 Q_L^{1.9865}$	$Q_s = 0.6787 Q_L^{1.8242}$
$\log(Q_s) = \log(A) + B \log(Q_L)$	$-0.22 + 1.8658 \log(Q_L)$	$-0.44 + 1.9865 \log(Q_L)$	$-0.17 + 1.8242 \log(Q_L)$
$\log(Q_s) \pm \Delta(\log(Q_s))$	$\log(Q_s) \pm 0.604$	$\log(Q_s) \pm 0.433$	$\log(Q_s) \pm 0.649$

Tab 9-2

PARTIE 3

ANALYSE DES RESULTATS

Hiver

	Total	Montée de la crue	La décrue
$Q_s = A Q_L^B$	$Q_s = 0.1655 Q_L^{1.8188}$	$Q_s = 0.2514 Q_L^{1.7932}$	$Q_s = 0.1879 Q_L^{1.7396}$
$\log(Q_s) = \log(A) + B \log(Q_L)$	$-0.78 + 1.8188 \log(Q_L)$	$-0.60 + 1.7932 \log(Q_L)$	$-0.73 + 1.7396 \log(Q_L)$
$\log(Q_s) \pm \Delta(\log(Q_s))$	$\log(Q_s) \pm 0.465$	$\log(Q_s) \pm 0.320$	$\log(Q_s) \pm 0.590$

Tab 9-3

Printemps

	Total	Montée de la crue	La décrue
$Q_s = A Q_L^B$	$Q_s = 0.2198 Q_L^{1.763}$	$Q_s = 0.3011 Q_L^{1.7266}$	$Q_s = 0.2128 Q_L^{1.7635}$
$\log(Q_s) = \log(A) + B \log(Q_L)$	$-0.66 + 1.763 \log(Q_L)$	$-0.52 + 1.7266 \log(Q_L)$	$-0.67 + 1.7635 \log(Q_L)$
$\log(Q_s) \pm \Delta(\log(Q_s))$	$\log(Q_s) \pm 0.688$	$\log(Q_s) \pm 0.487$	$\log(Q_s) \pm 0.675$

Tab 9-4

Eté

	Total	Montée de la crue	La décrue
$Q_s = A Q_L^B$	$Q_s = 0.6958 Q_L^{2.1881}$	$Q_s = 0.0027 Q_L^{3.4279}$	$Q_s = 0.9087 Q_L^{1.6188}$
$\log(Q_s) = \log(A) + B \log(Q_L)$	$-0.16 + 2.1881 \log(Q_L)$	$-2.57 + 3.4279 \log(Q_L)$	$-0.95 + 1.6188 \log(Q_L)$
$\log(Q_s) \pm \Delta(\log(Q_s))$	$\log(Q_s) \pm 0.339$	$\log(Q_s) \pm 0.294$	$\log(Q_s) \pm 0.08$

Tab 9-5

10- Détermination des charges en sédiments dans le bassin de l'Isser:

A partir des courbes des débits classés en fonction des fréquences cumulées, correspondant à chaque échantillon (FIG. 10-1), (voir aussi Annexe2) , nous avons calculé la charge en sédiment que peut rejeter le bassin de l'Isser, (on estime le charriage à 30% de la charge totale). Nous avons spécifié alors le transport solide pendant chaque saison, durant la montée de la crue et la décrue.

Quantification du transport solide du bassin de l'Isser

Automne	Montée de la crue	La décrue	Apport total par saison
Apport liquide (hm3)	13.62	15.33	28.95
Apport solide (tonnes)	652629	424827	1077456
Hiver	Montée de la crue	La décrue	App. Tot / saison
App. liquide (hm3)	63.51	92.19	155.7
App. solide (T)	1644804	527994	2172798
Printemps	Montée de la crue	La décrue	App. Tot /saison
App. liquide (hm3)	35.1	131.52	166.62
App. Solide (T)	1269363	868887	2138250
Eté	Montée de la crue	La décrue	App. Tot /saison
App. liquide(hm3)	2.64	7.71	10.35
App. Solide (T)	1058736	1002564	2061300
Apport liquide total annuel(hm3)	114.87	246.75	361.62
Apport solide total annuel (tonnes)	4625532	2824272	7449804

Tab. 10-1

Les constatations que l'on peut faire à partir du tableau (Tab 9-1) sont:

- Le volume d'eau apporté lors de la montée de la crue est inférieur à celui de la décrue.
- Les apports solides sont beaucoup plus importants au cours de la montée de la crue qu'à la décrue; on peut expliquer cela, par la présence d'un facteur actif à l'érosion qui est la pluie, qui exerce une force assez importante sur le sol grâce à son intensité.

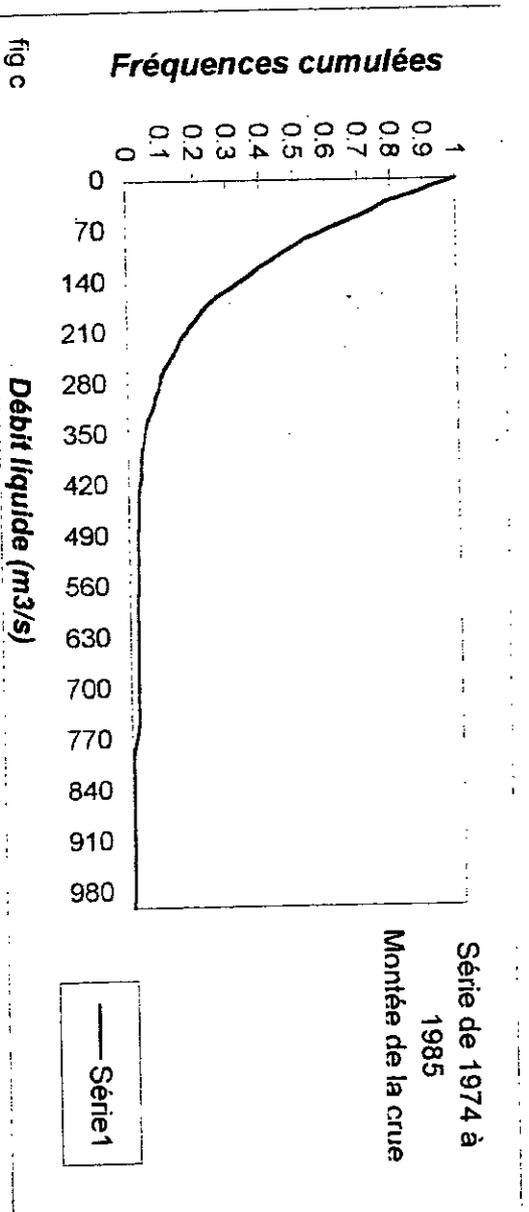
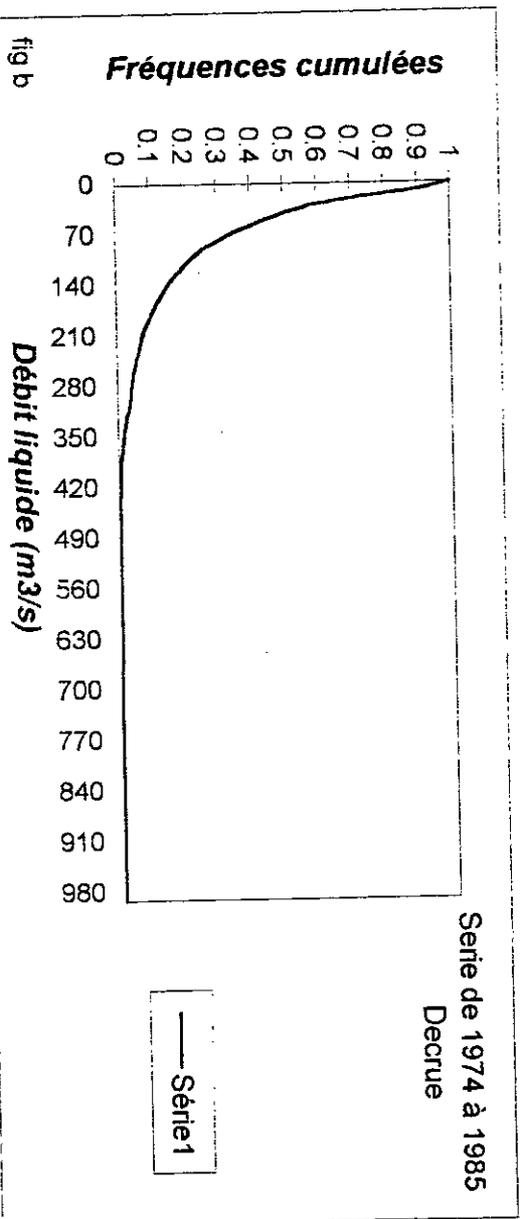
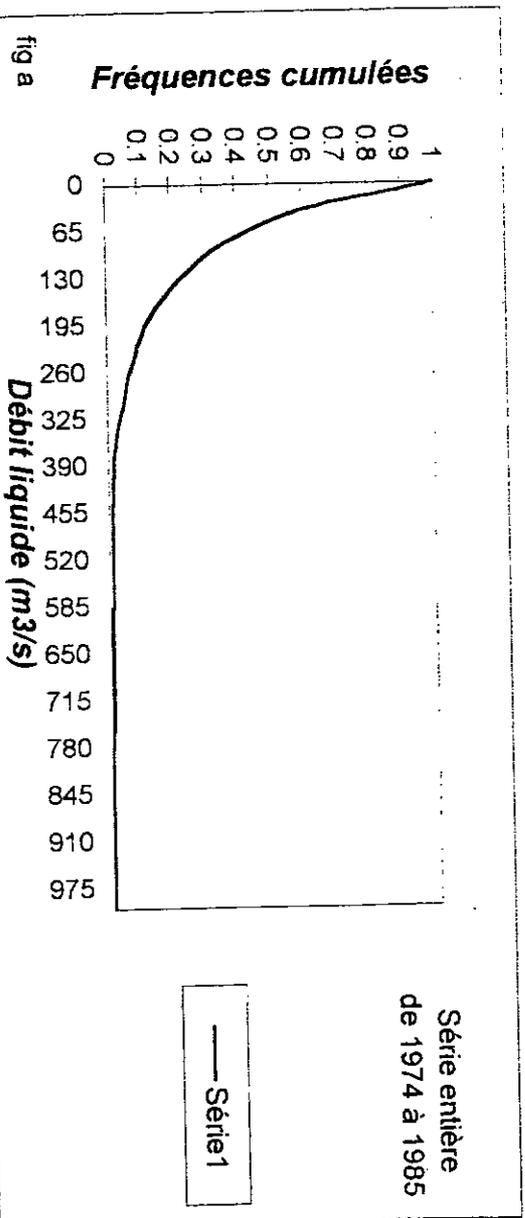


FIG NO. 1

COMPLEXE DES DÉBITS CLASSES
BASSIN DE LISSER
STATION DE L'ARZADARHA (090501)

- On constate l'importance de l'érosion pendant l'hiver, cet apport en matières solides diminue successivement d'une saison à l'autre pour atteindre son minimum pendant l'automne, on peut expliquer cela par l'apport liquide important durant l'hiver et le printemps ainsi que la dominance du ruissellement pendant ces périodes de l'année due à l'état du sol saturée. Contrairement à l'été et l'automne où le sol est beaucoup moins cohérent et très perméable, ce qui ne permet pas le transport des particules par ruissellement.
- L'apport solide spécifique du bassin de l'Isser sera alors:

$$T_{ST} = \text{Apport solide annuel} / \text{la surface du bassin versant}$$

La surface du bassin de l'Isser étant égale à 3615 km²

D'où:

$$T_{ST} = 7749804 / 3615$$

$$T_{ST} = 2060.8 \text{ T/km}^2/\text{an}$$

Taux en sédiments très important !!

La valeur trouvée par DEMMAK est de 1711.629 T/km²/an. On voit bien que les deux résultats sont rapprochés.

Remarque:

T_{ST} : est l'apport solide total. Dans les calculs, nous avons considéré le charriage comme étant 30% du transport solide total.

CONCLUSION

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

L'analyse des crues survenues dans le bassin de l'Isser, a permis de mettre en évidence les modèles recherchés. Ainsi, nous avons confirmé la forme générale de l'équation de la régression entre débit solide et débit liquide:

$$Q_S = A Q_L^B$$

La mise au point d'une corrélation entre débits liquides et débits solides, spécifiques aux crues, a révélée des coefficients de détermination assez importants et significatifs. De ce fait, nous remarquons l'importance de la contribution des crues dans le phénomène du transport solide.

Une étude plus poussée a été envisagée, elle concerne la détermination de l'influence de la montée de la crue. et la décrue sur le phénomène étudié. Ceci a donné des résultats très satisfaisants, puisque nous avons conclu que le transport solide se manifeste mieux en montée qu'en décrue, nous avons donc lié cela à l'existence de la pluie.

Ceci ne veut en aucun cas signifier que les facteurs crues et pluies sont les seuls à donner du transport solide, au contraire, d'autres facteurs existent, et si l'on veut réussir à faire une bonne étude du phénomène, il faudra donc intégrer ces facteurs, car le transport solide est un résultat d'une combinaison de plusieurs paramètres coexistants.

Le travail que nous venons de faire à l'échelle saisonnière vient confirmer l'idée suscitée. Ainsi, nous avons constaté la diversité des apports d'une saison à l'autre, vue les spécifications de chacune d'elle (température, pluviométrie, couvert végétal, ...etc.).

Une tentative d'approche que nous avons effectuée et qui n'a pas été mentionnée dans la thèse, concerne à étudier l'influence des pluies sur le transport solide. Pour cela, nous avons sélectionné toutes les pluies qui ont engendré les crues étudiées, ensuite, pour chaque débit max. d'une crue, nous avons cherché la pluie maximale correspondant. Il est à signaler que le débit liquide max. ne correspond pas toujours au débit solide max. Avec ces données, nous avons essayé de visualiser le nuage de points. La première constatation est que ce nuage est dispersé, et ne présente aucune allure qui peut permettre un ajustement d'une courbe quelconque. De même, lorsque nous avons effectué un changement de variables.

Une chose est sûre, c'est qu'une conclusion directe ne peut être tirée à cette étape primaire de l'étude, car on sait très bien que la pluie a sa part dans l'érosion. Aussi, il faut bien se poser la question, si les données pluviographiques utilisées sont significative. Il est à noter que ces données sont mesurées dans une station pluviographique qui s'éloigne de la station hydrométrique de LAKHDARIA de 70km; distance assez grande pour réduire l'effet de la pluie,

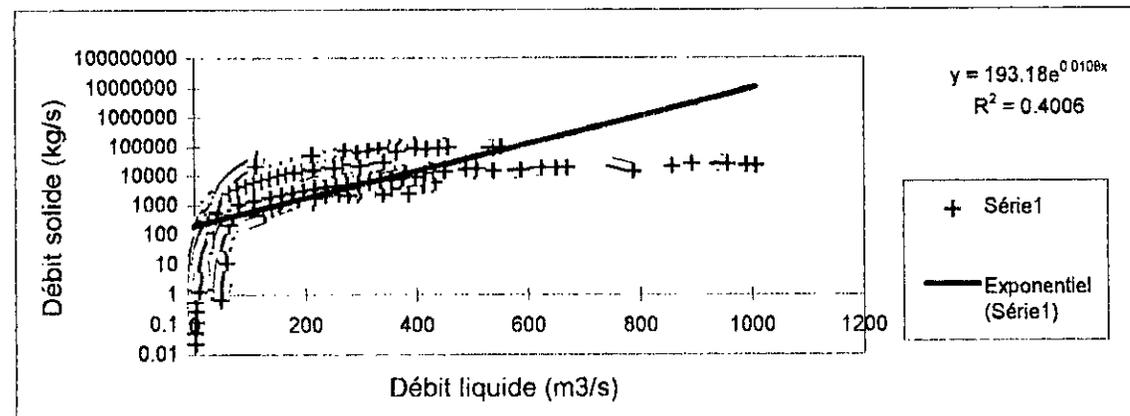
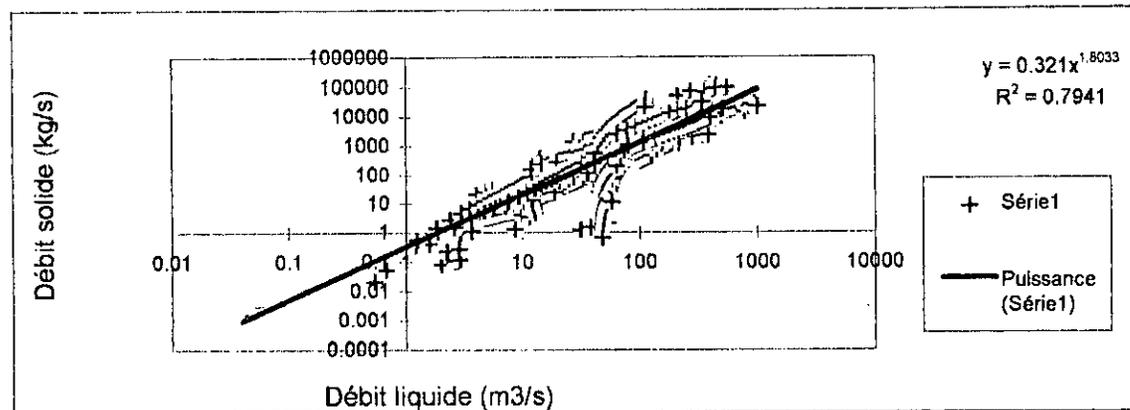
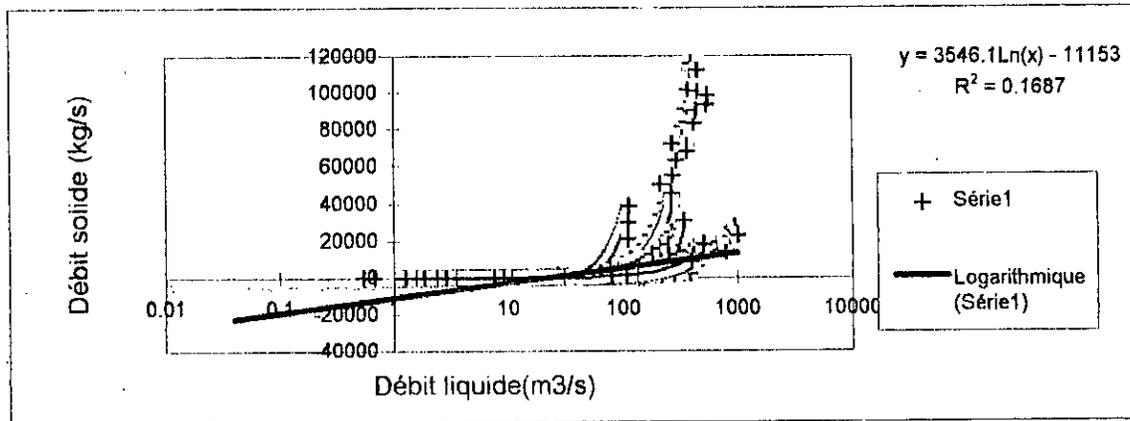
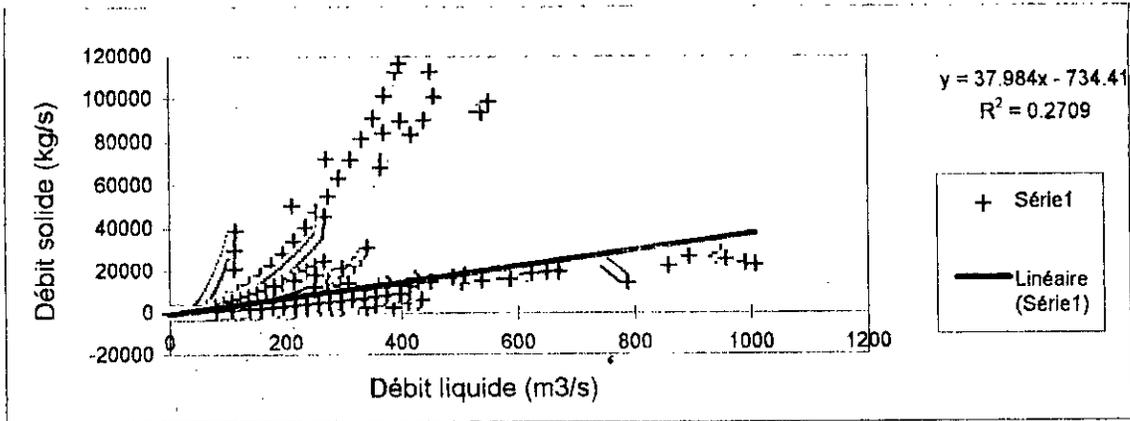
CONCLUSION

mais on ne pouvait choisir mieux car c'était les seules données disponibles, (dépouillées), qu'on pouvait avoir de l'ANRH.

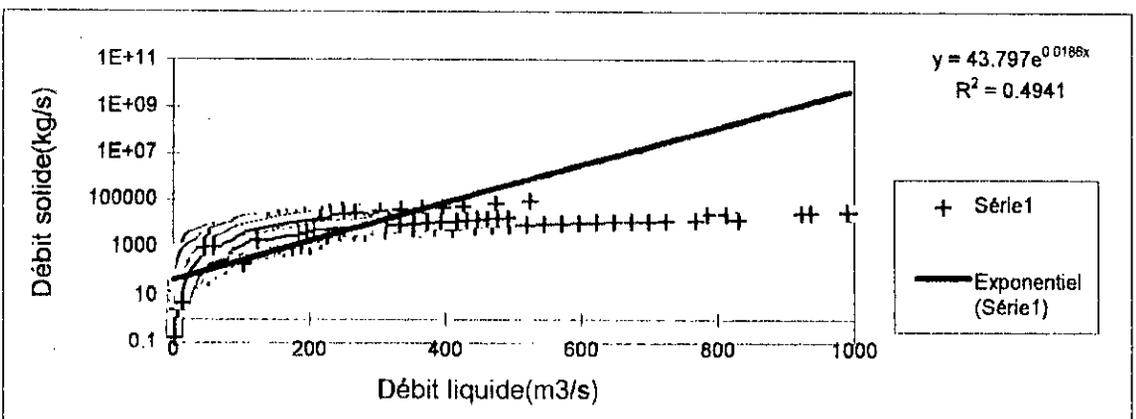
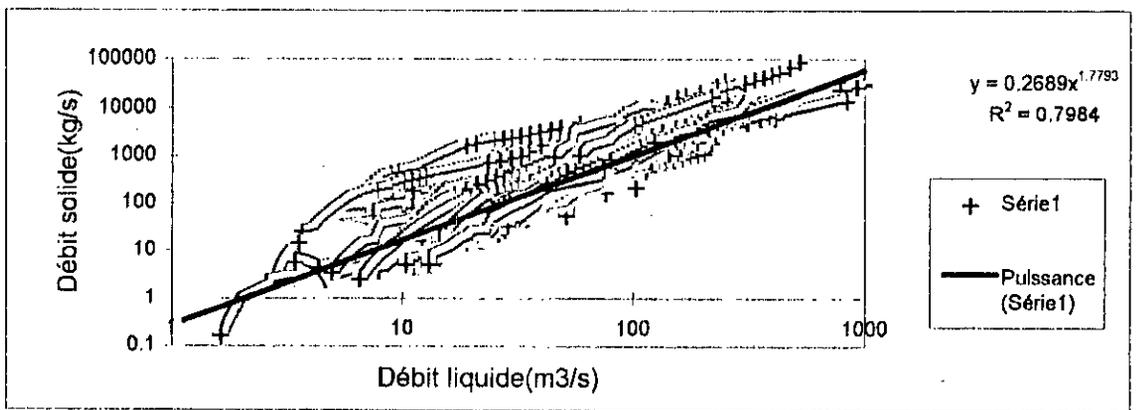
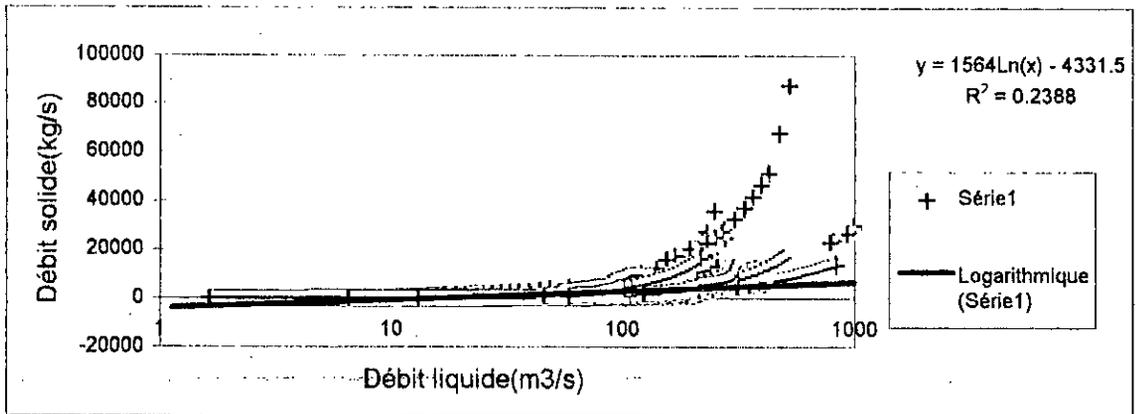
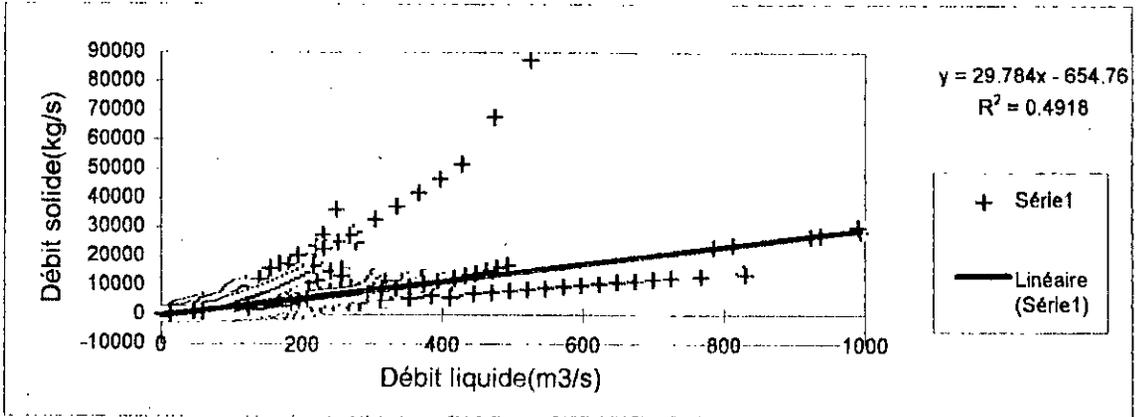
On propose pour la prochaine étude, s'il y a lieu, d'inclure ce paramètre de pluie; d'abord, il faudra sélectionner les crues, ensuite dépouiller toutes les pluies leur donnant naissance. Essayer d'avoir pour chaque point du pluviogramme son correspondant sur l'hydrogramme et le solidigramme, et définir bien sur le décalage horaire entre l'événement pluie et son succédant "la crue", enfin d'essayer de faire une corrélation multiple entre débit solide, débit liquide et hauteur de pluie(ou intensité de la pluie).

ANNEXE 1

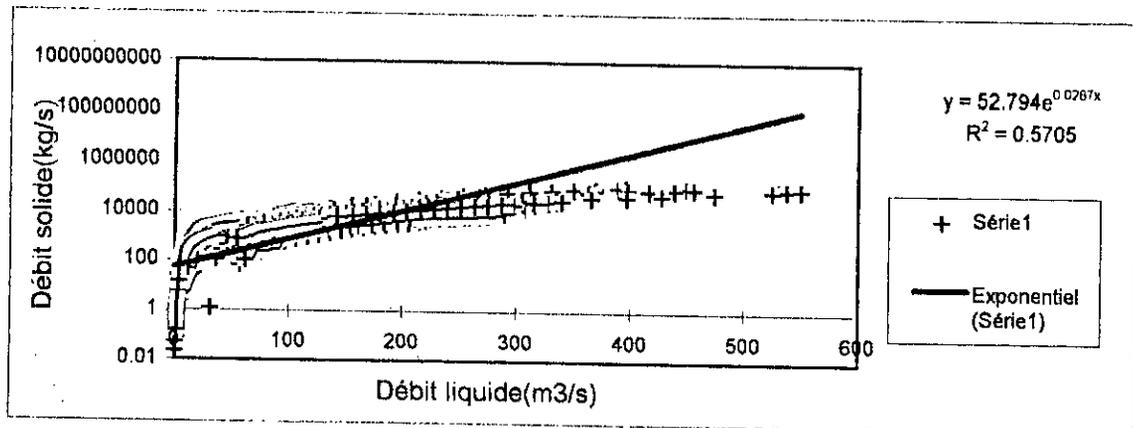
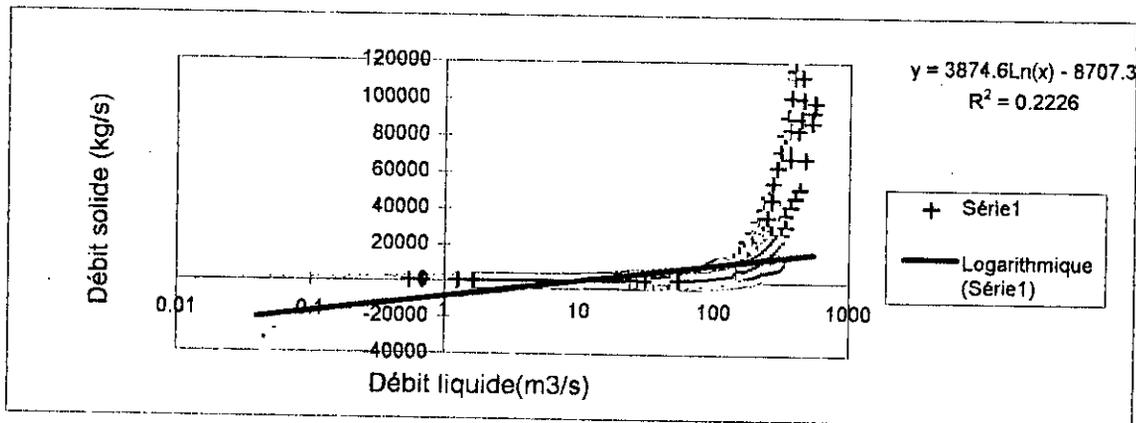
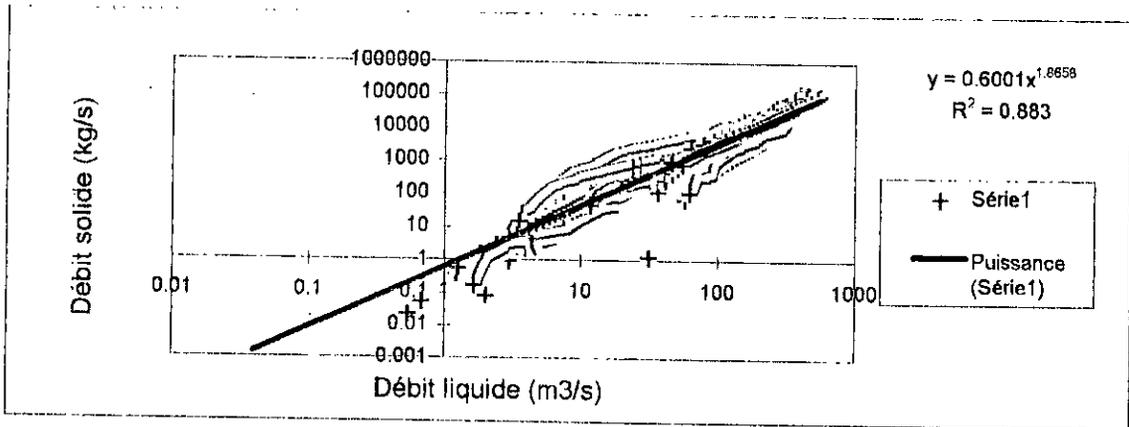
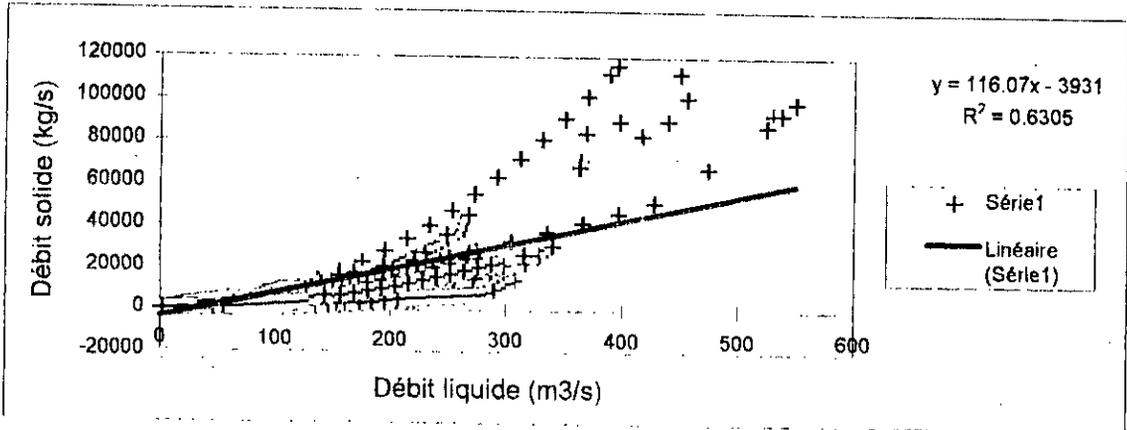
Montée de la crue



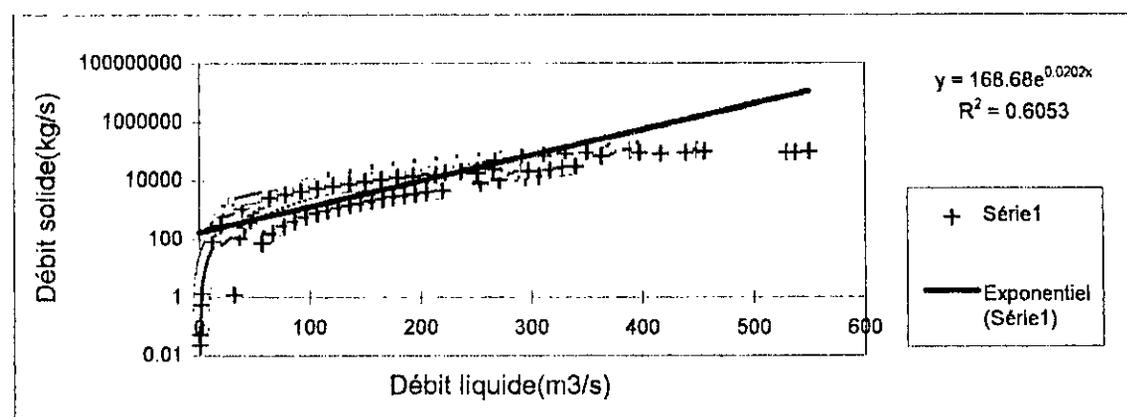
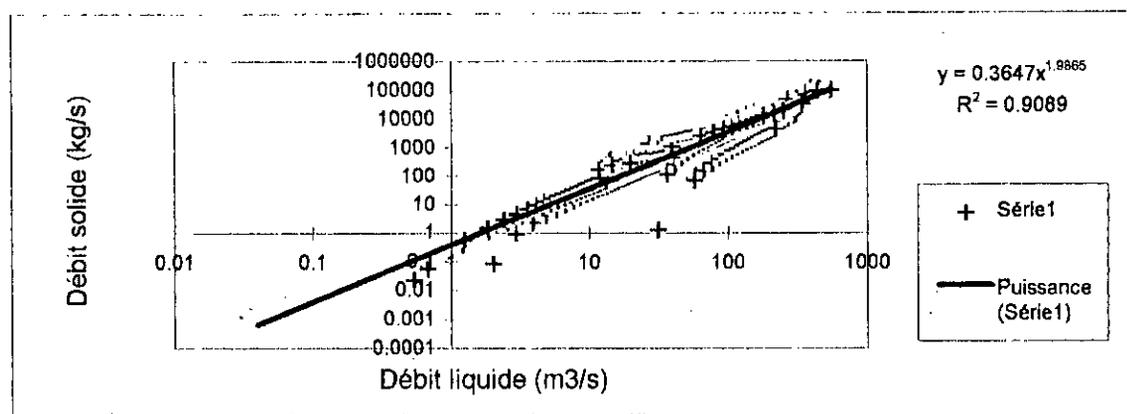
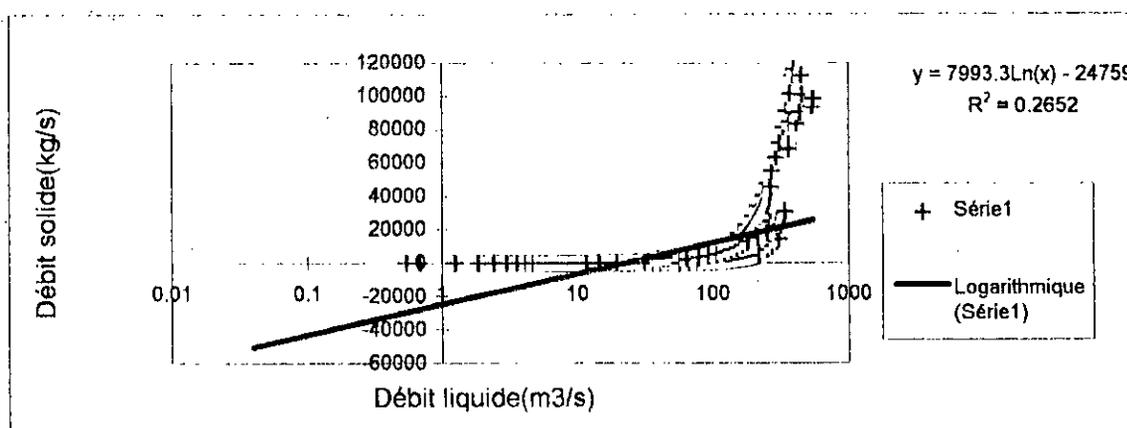
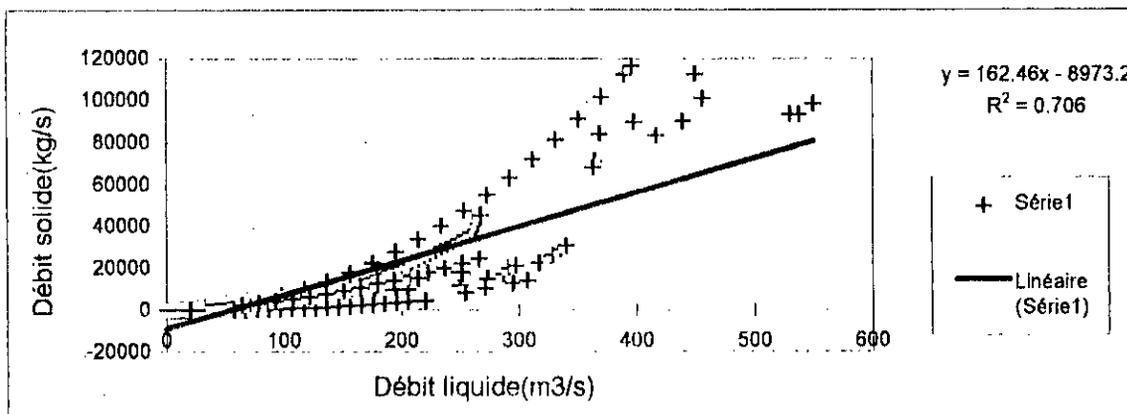
Decrue



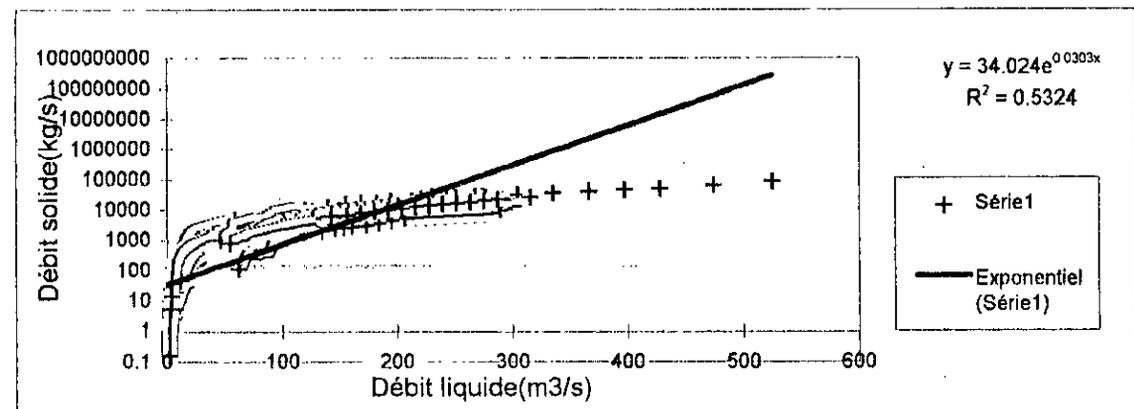
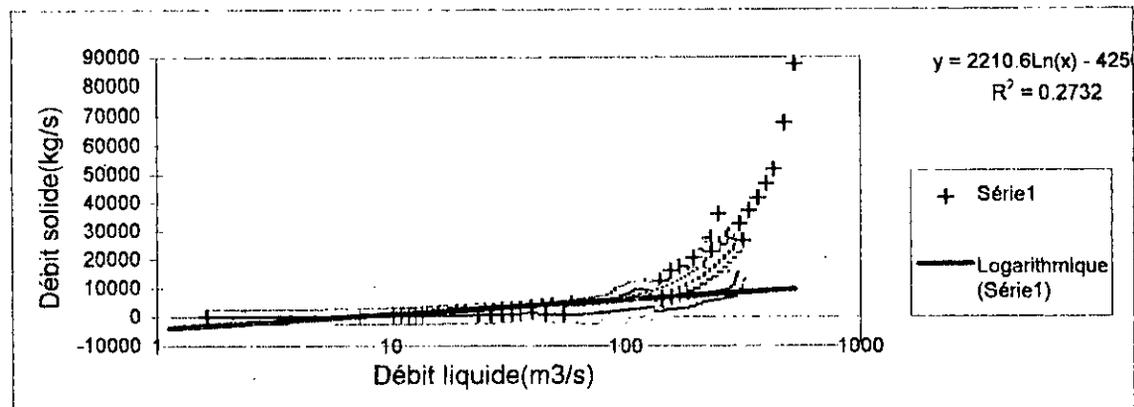
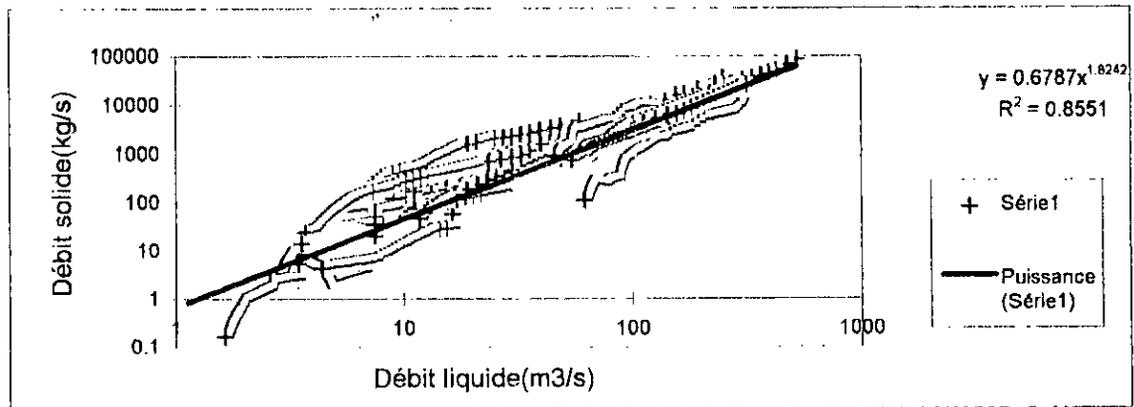
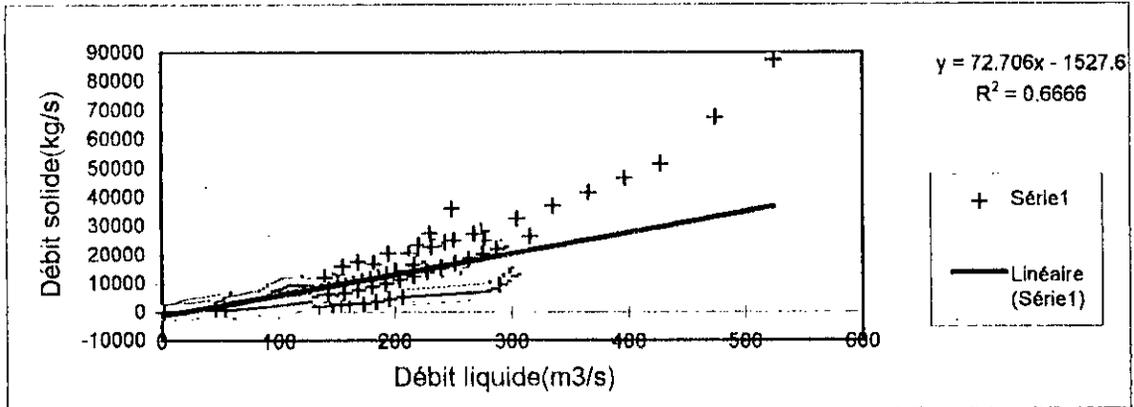
Automne



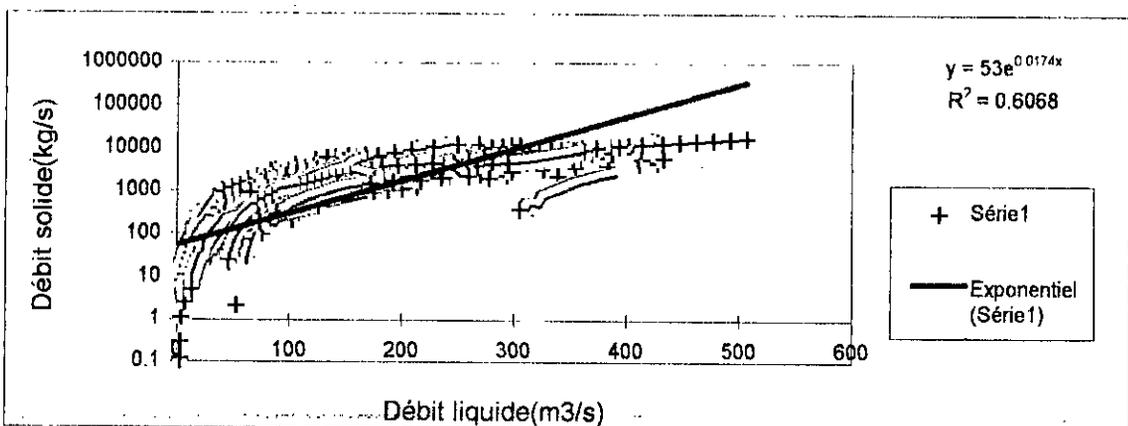
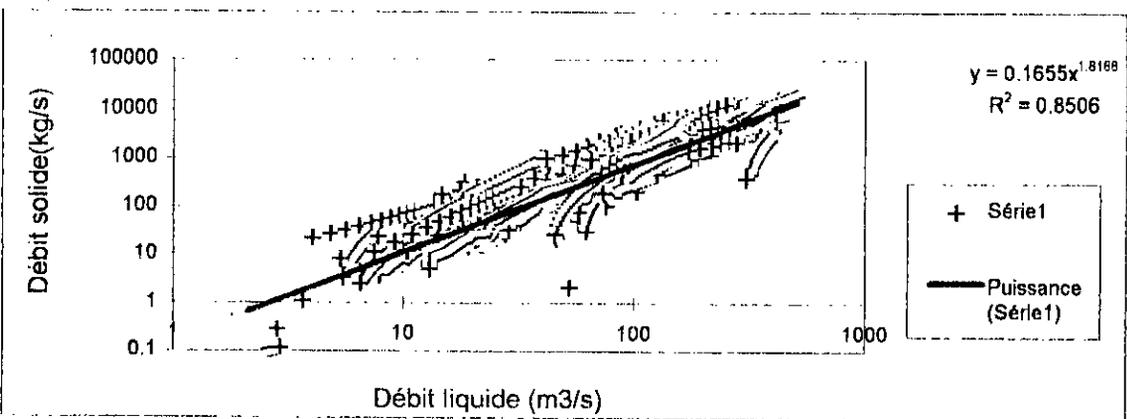
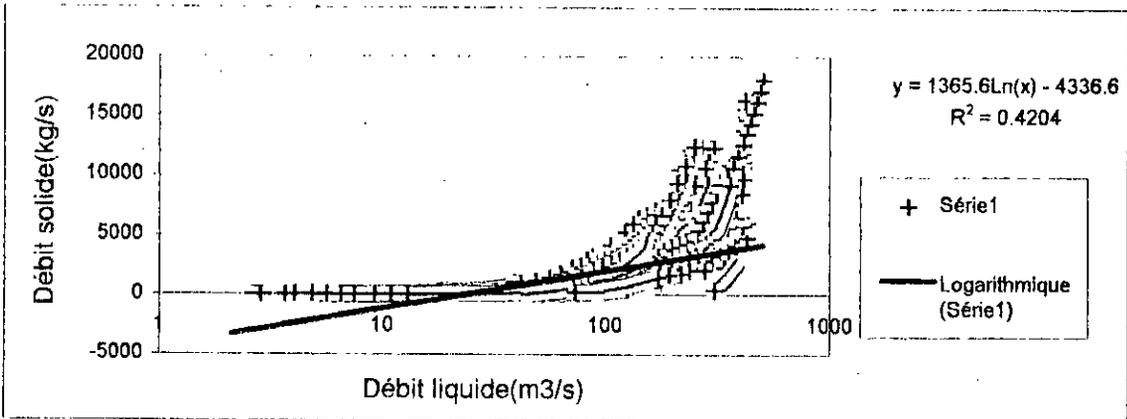
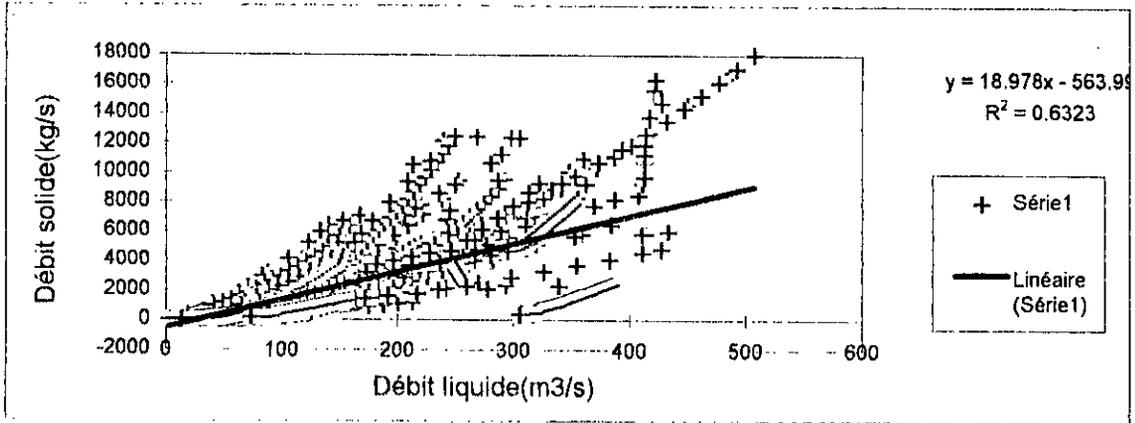
Automne: montée de la crue



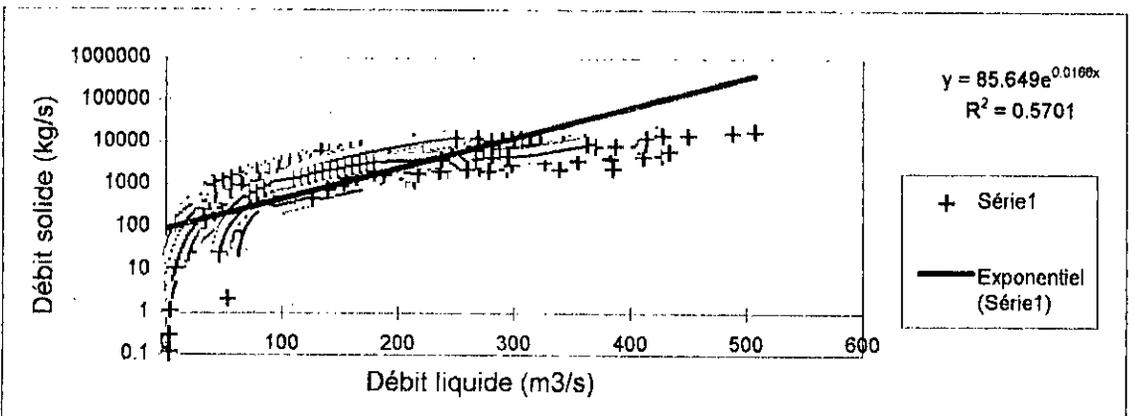
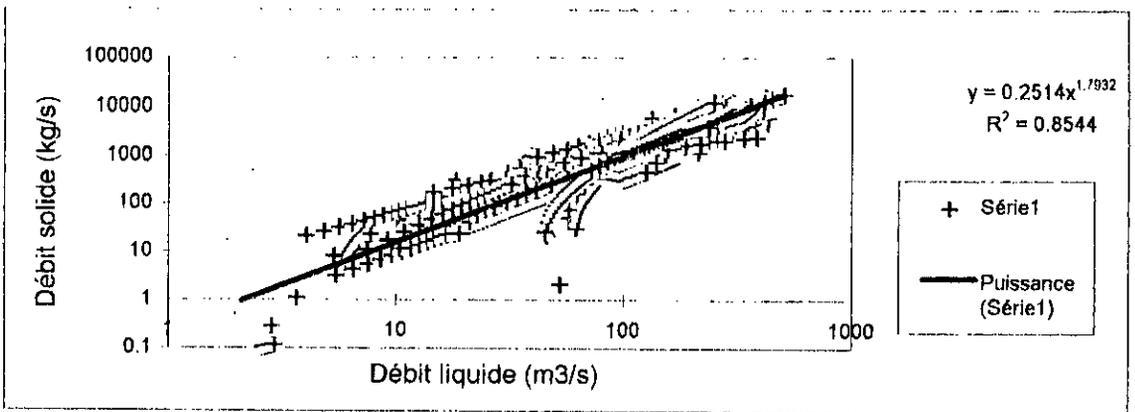
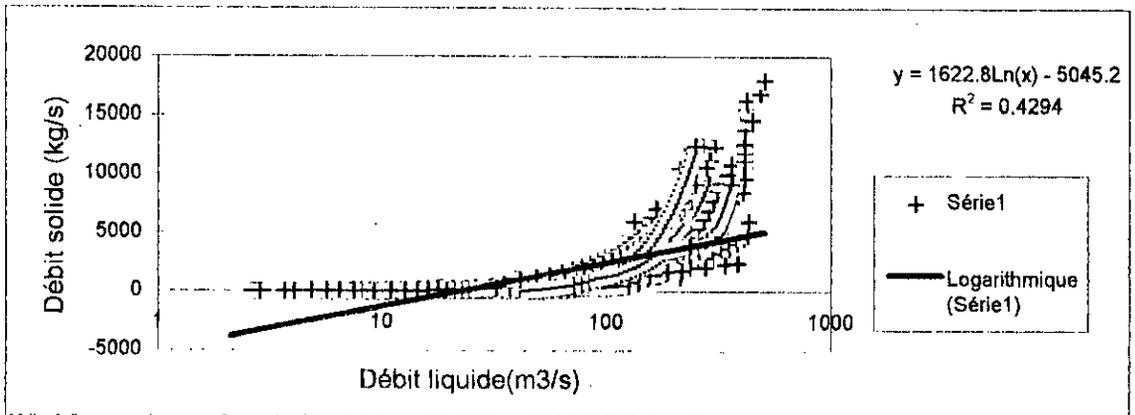
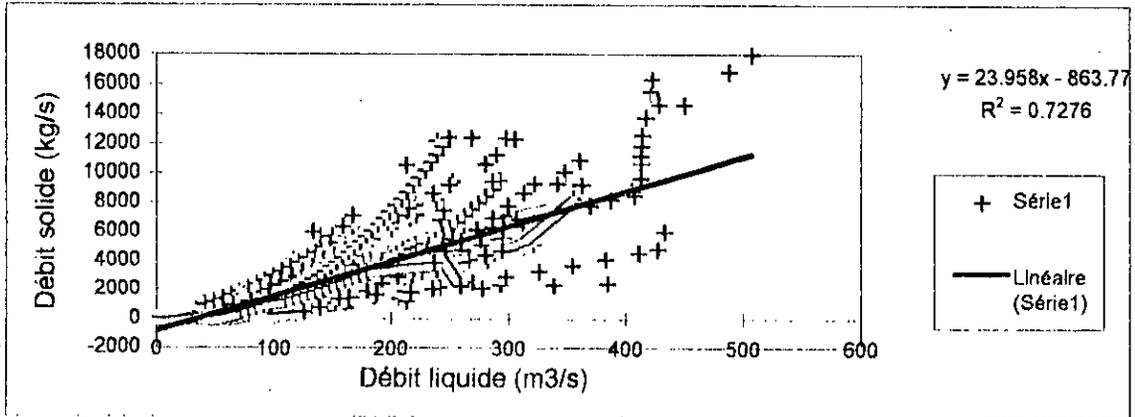
Automne:decrue



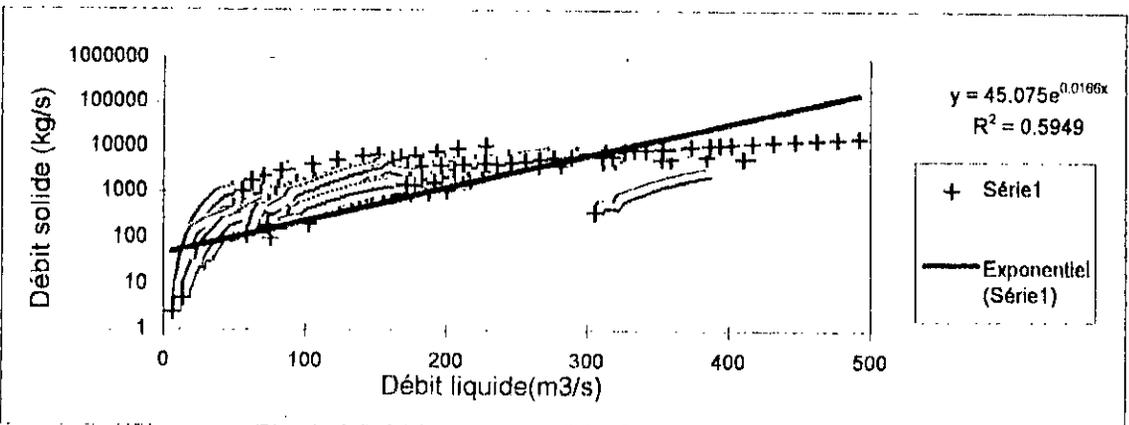
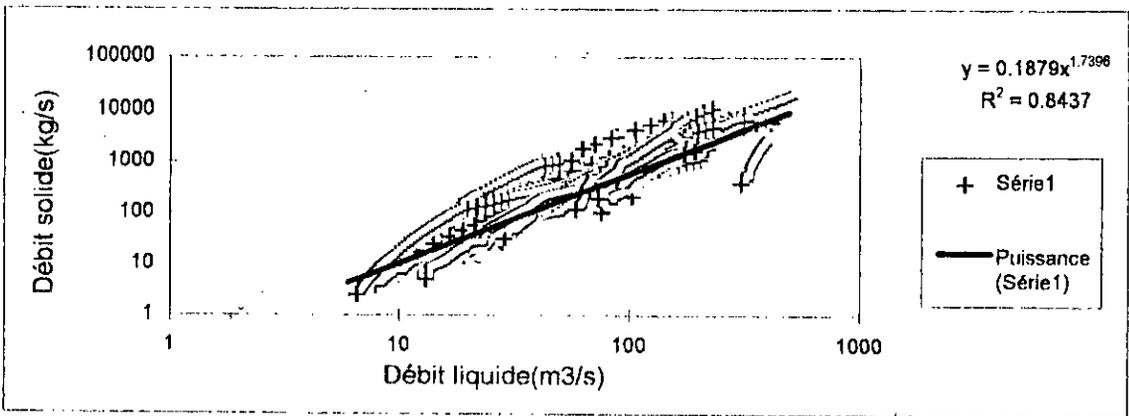
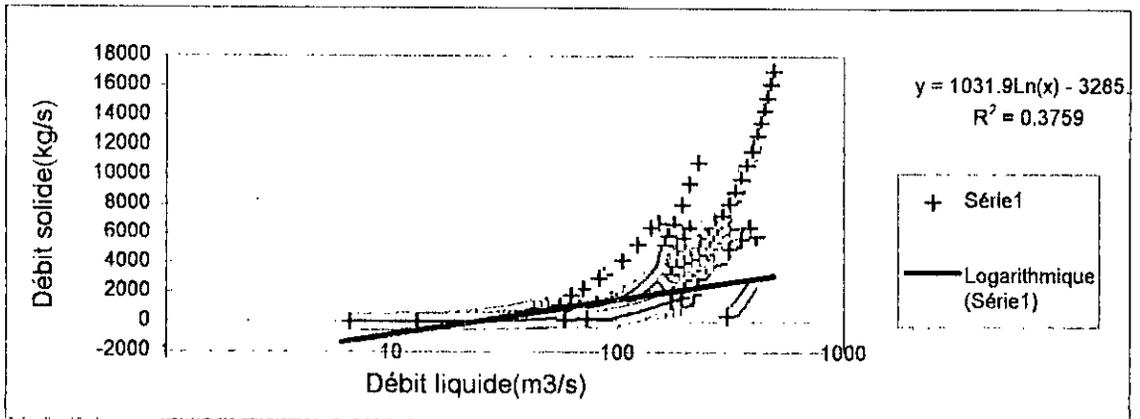
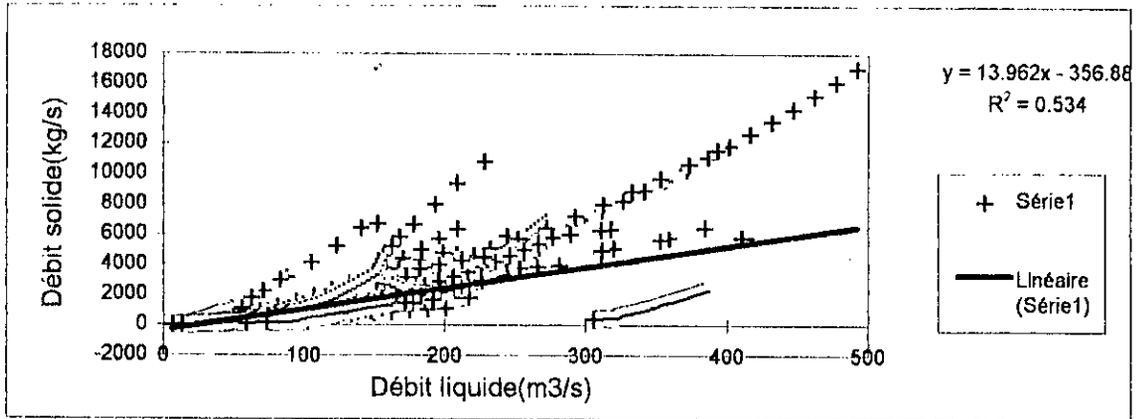
Hiver



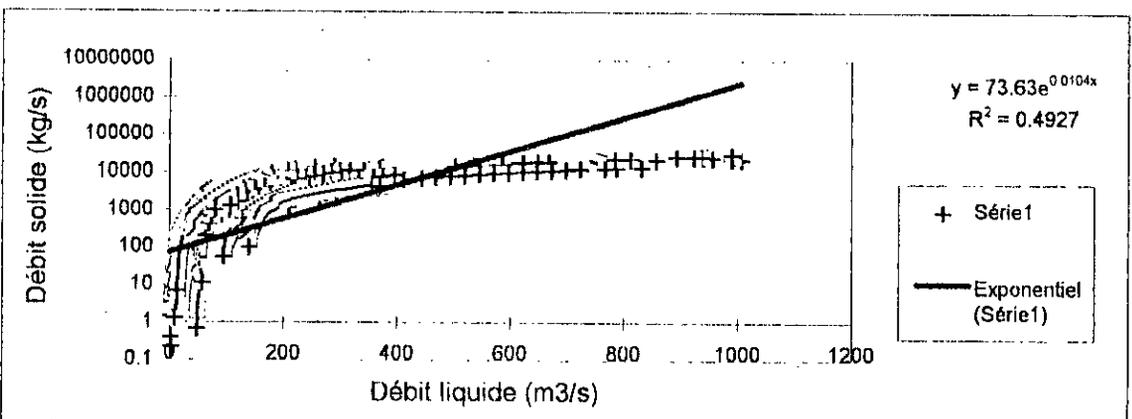
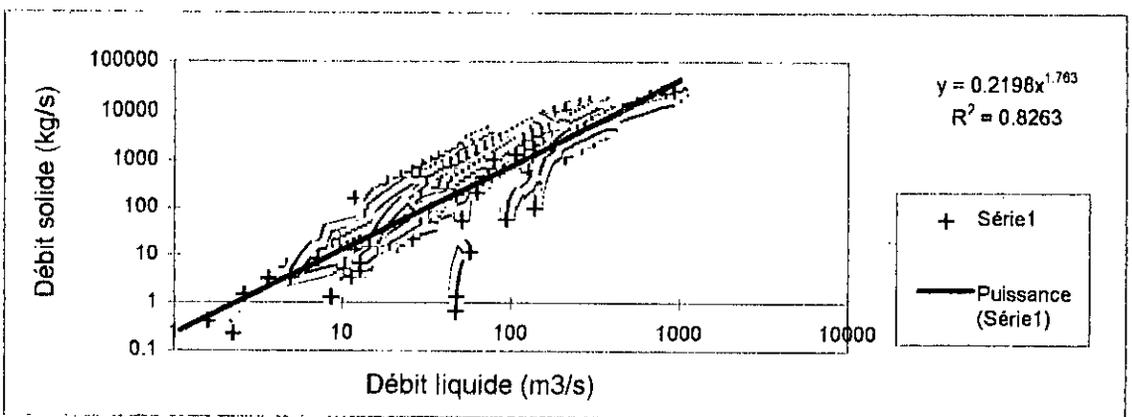
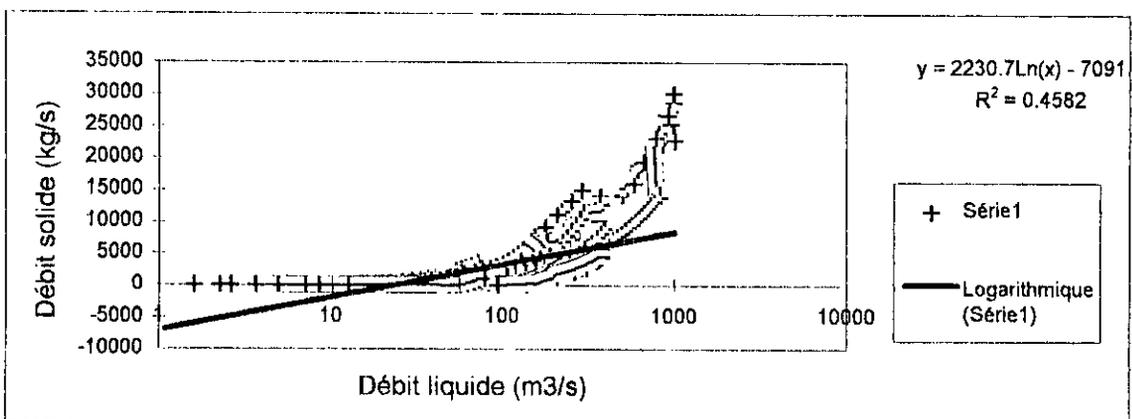
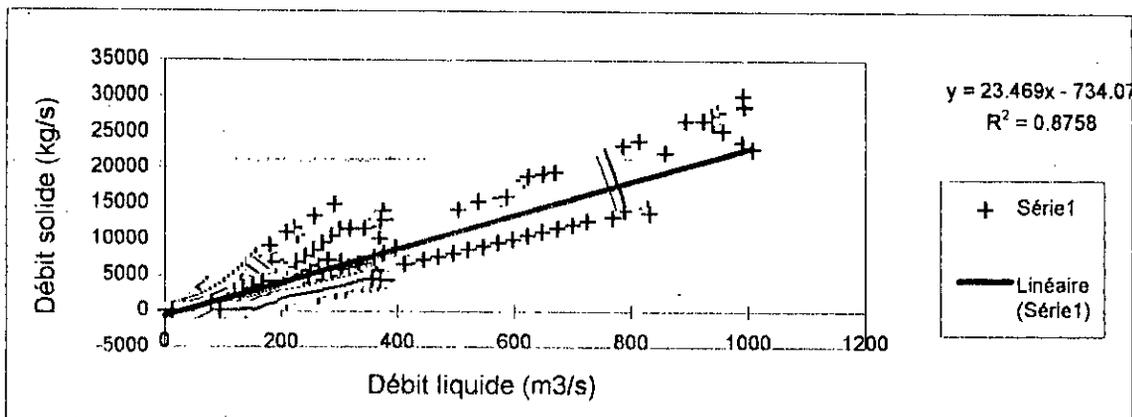
Hiver : montée de la crue



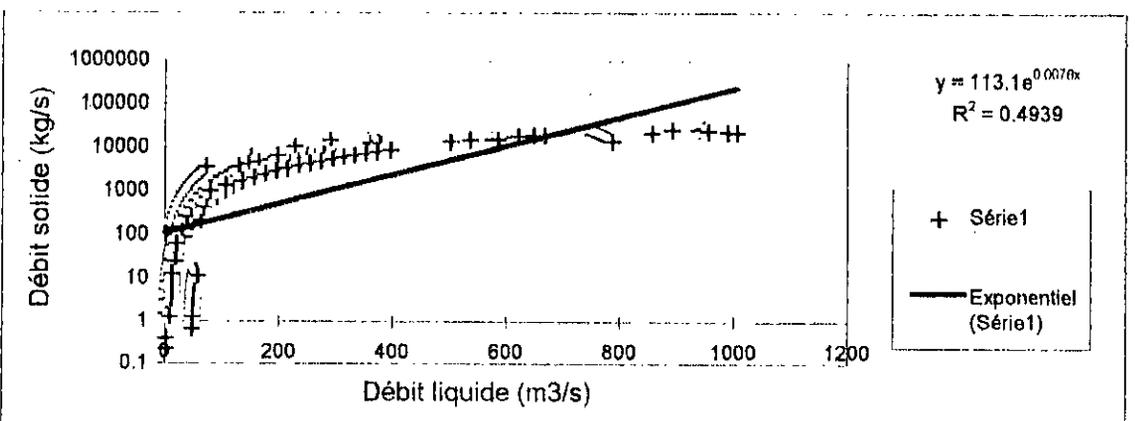
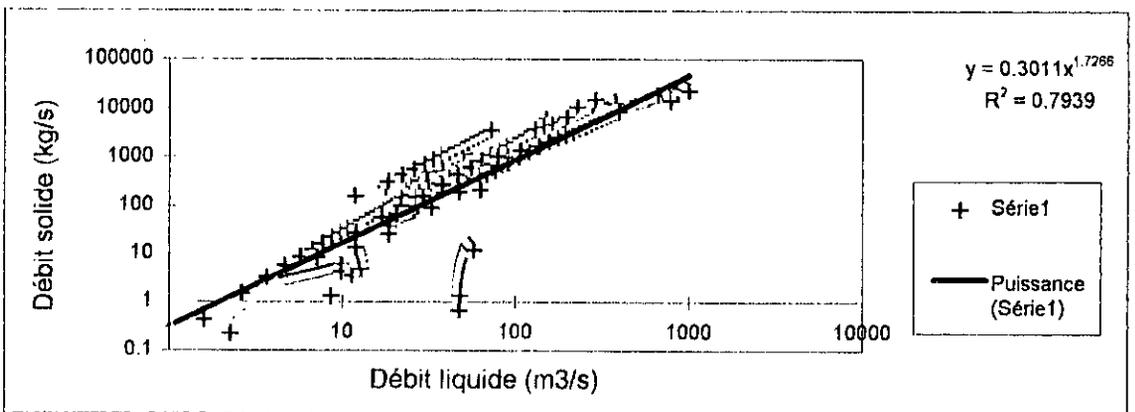
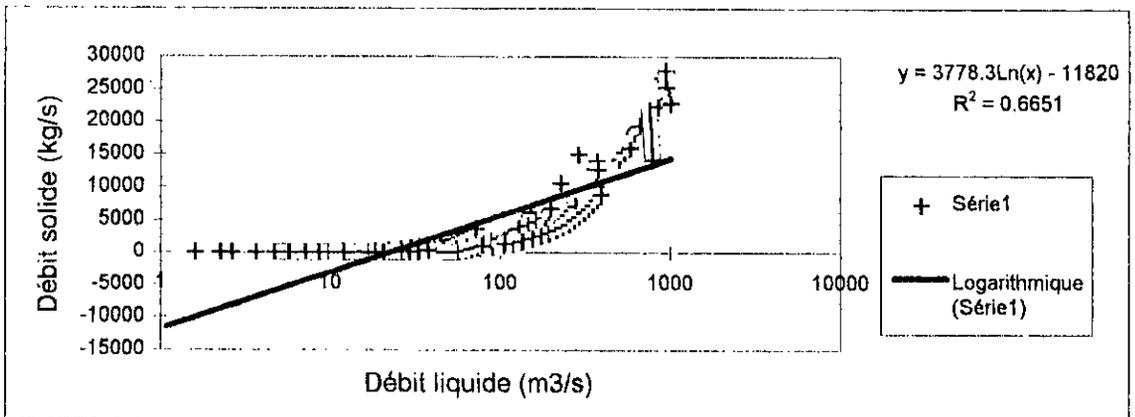
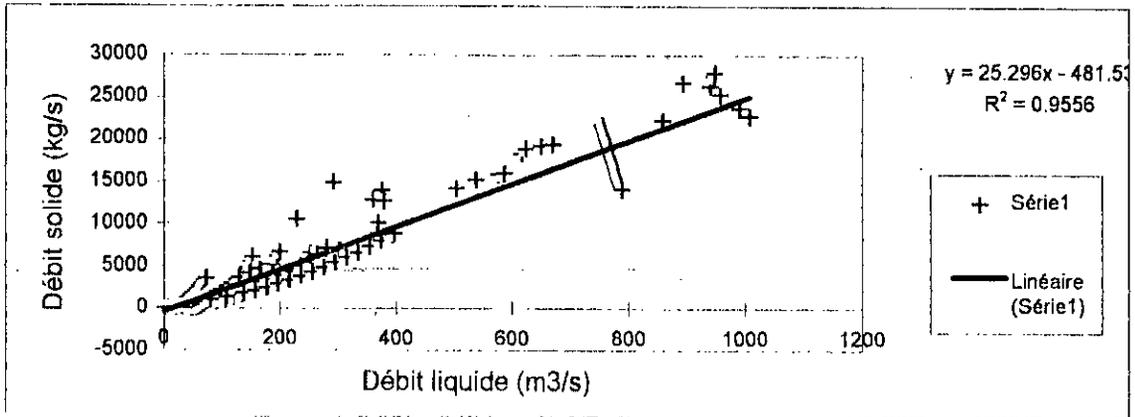
Hiver:décru



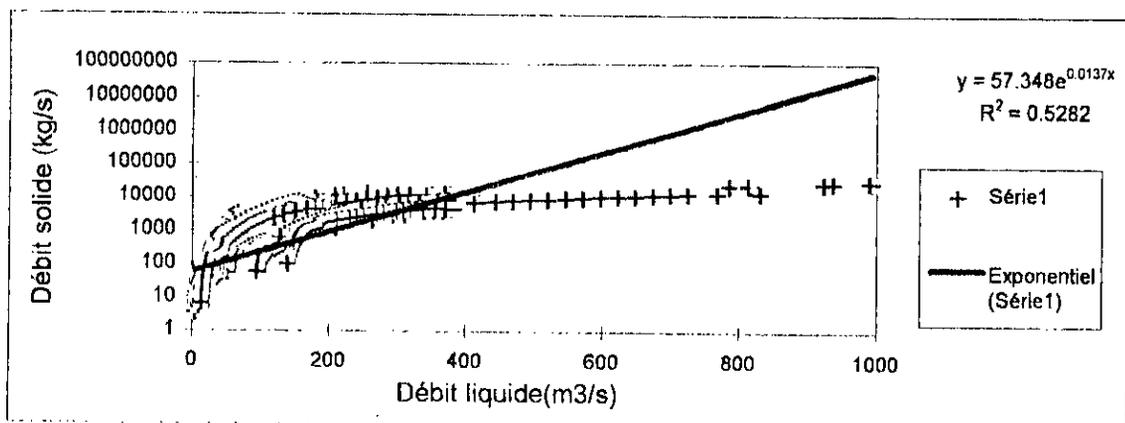
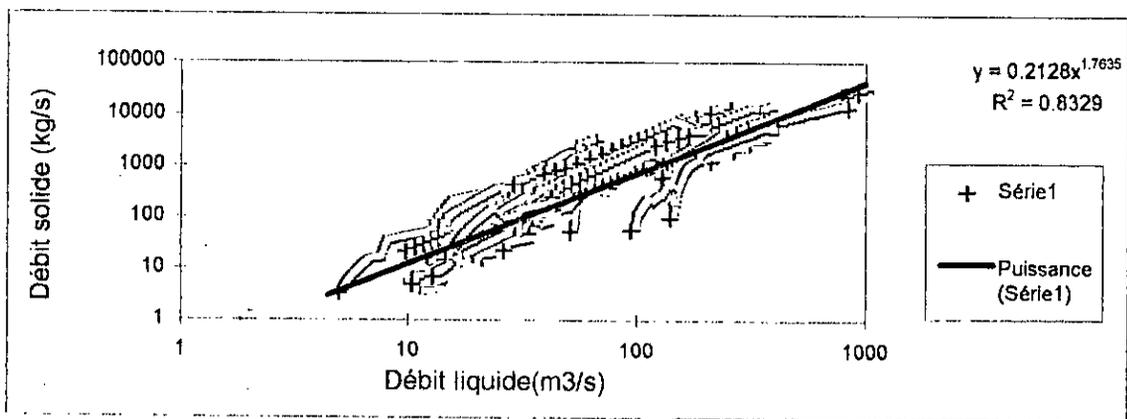
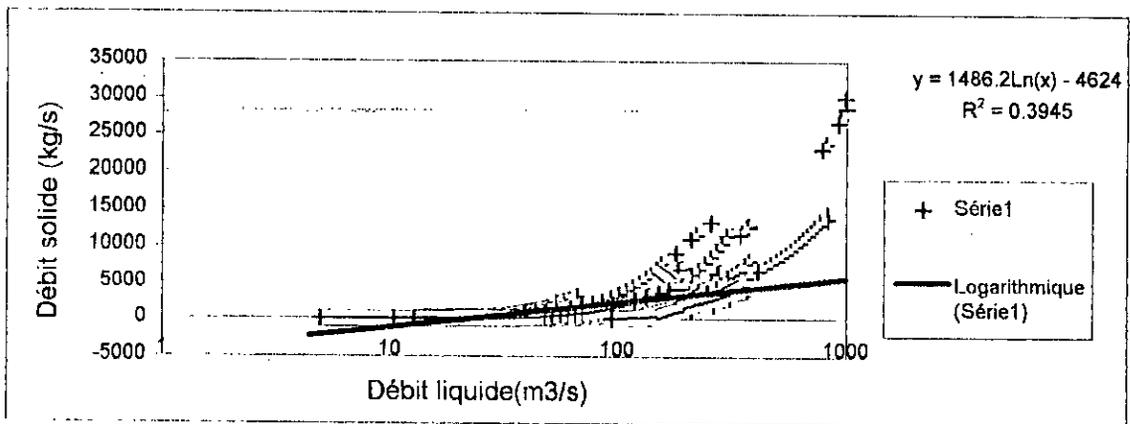
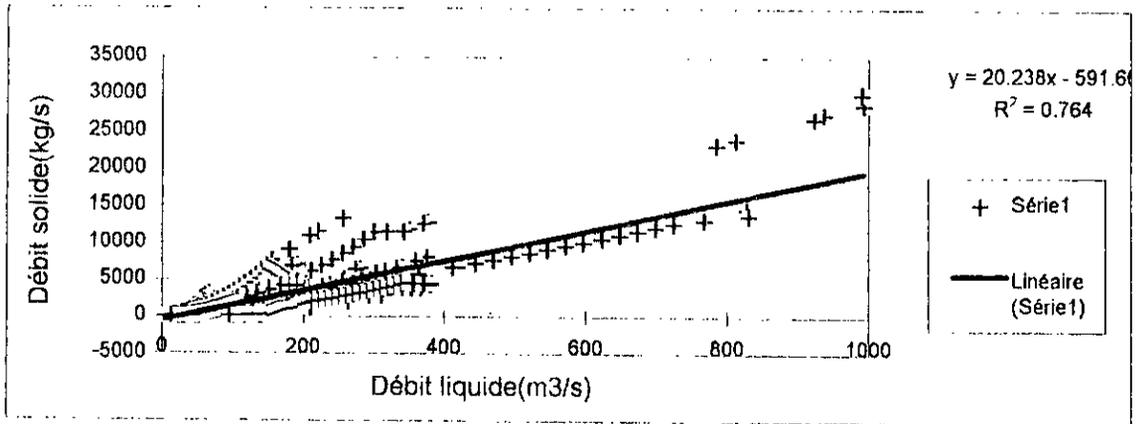
Printemps



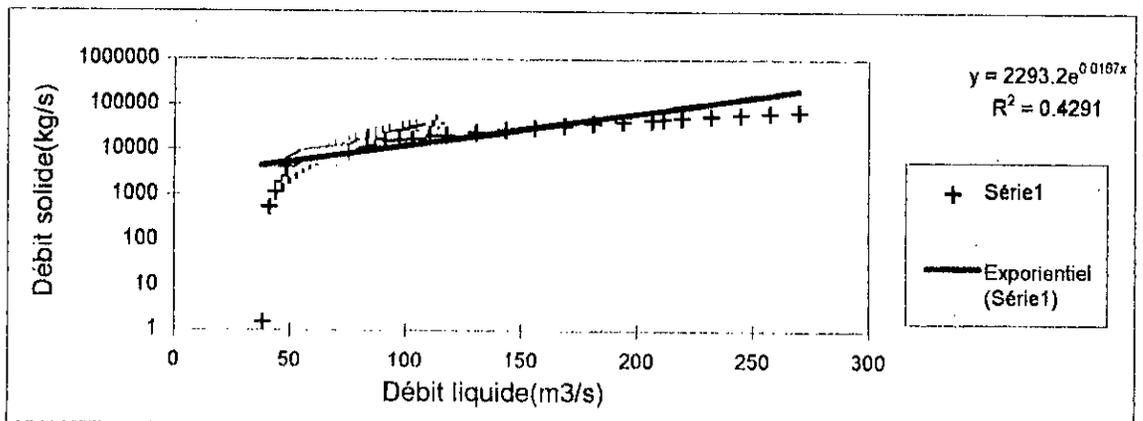
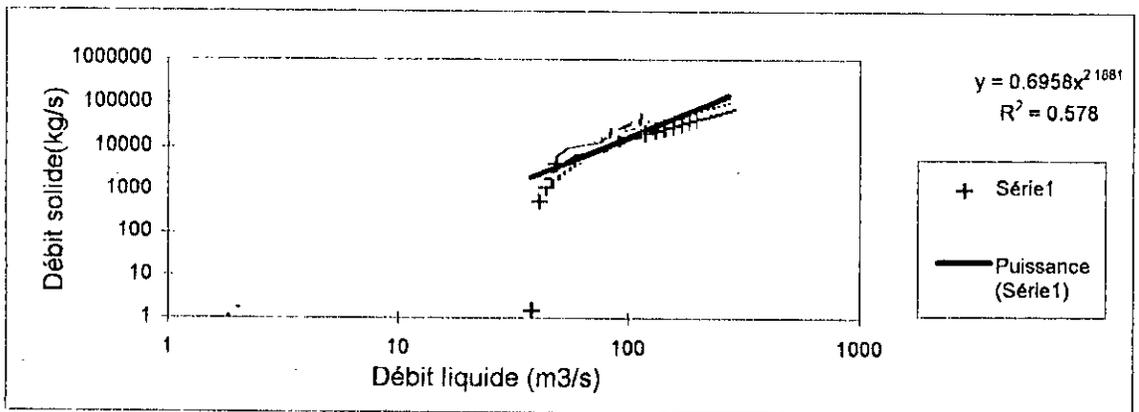
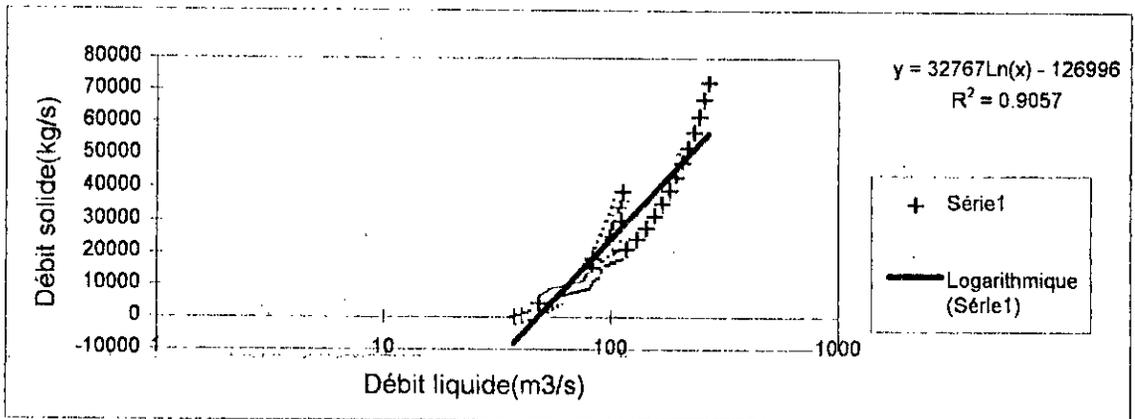
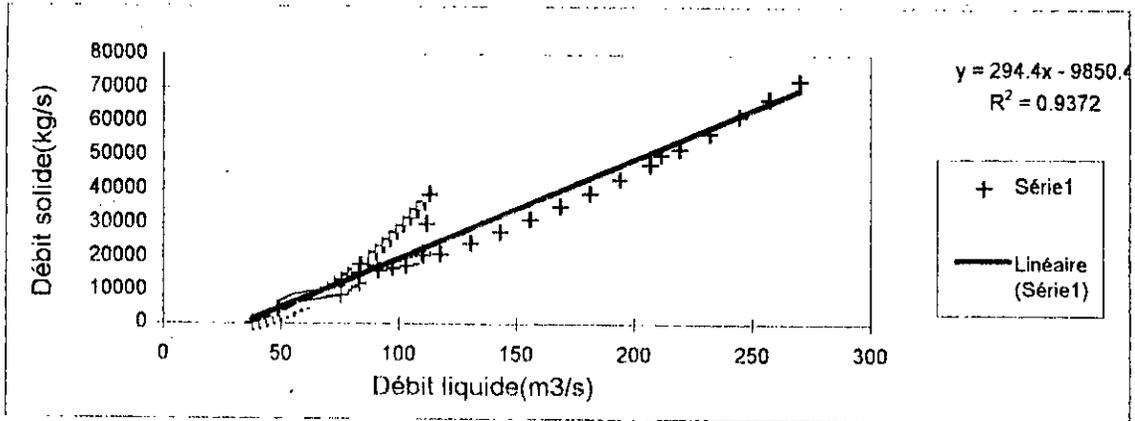
Printemps : montée de la crue



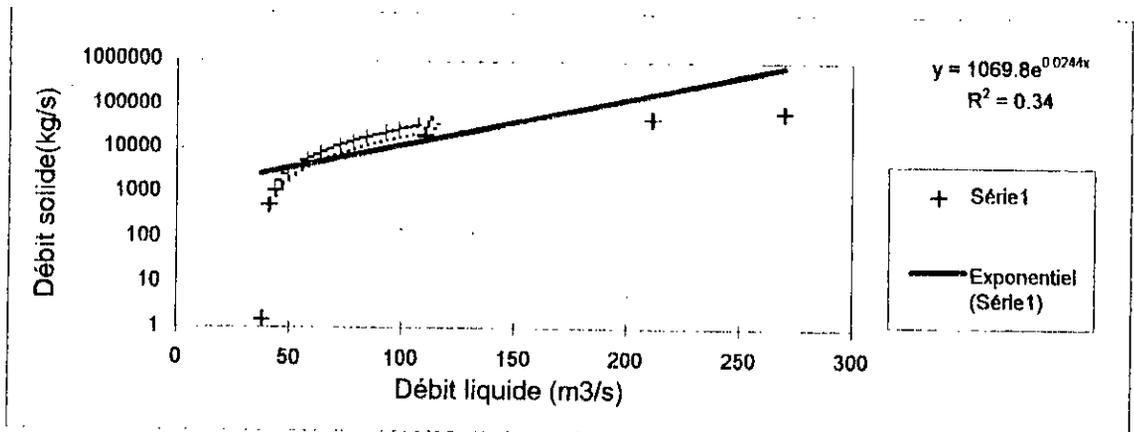
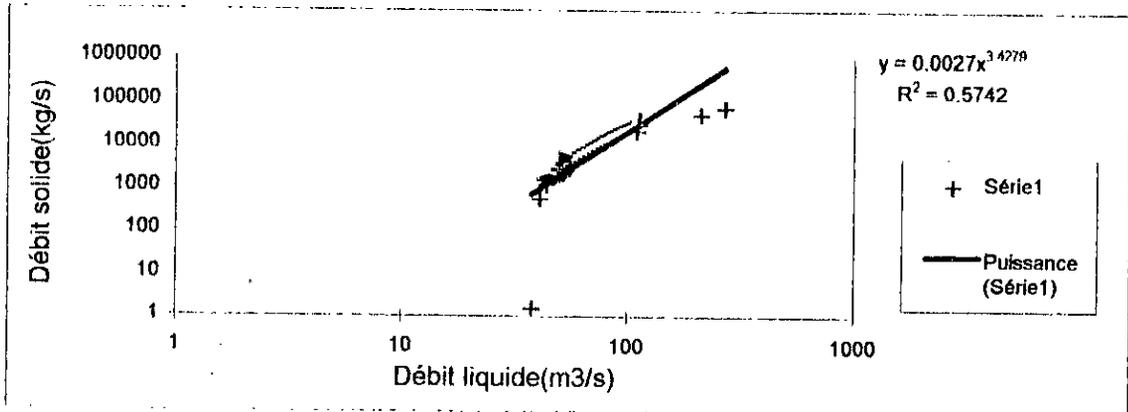
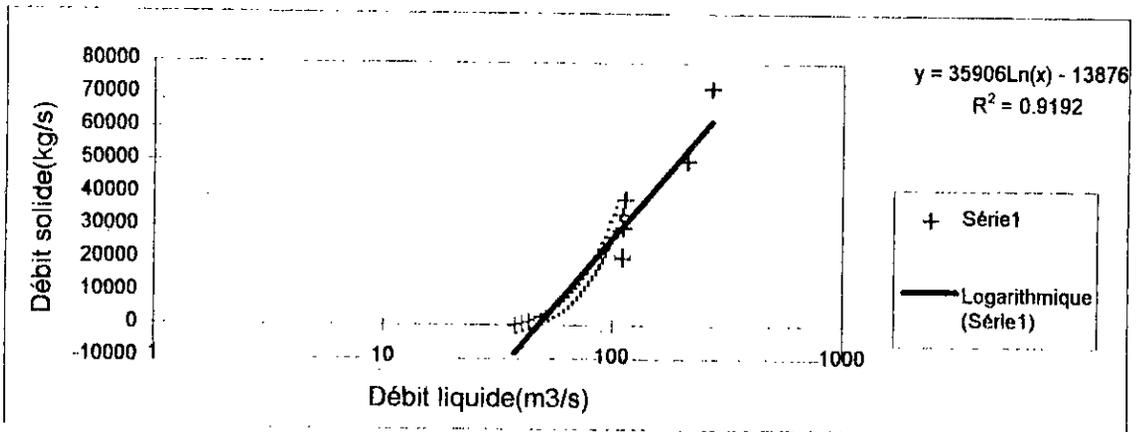
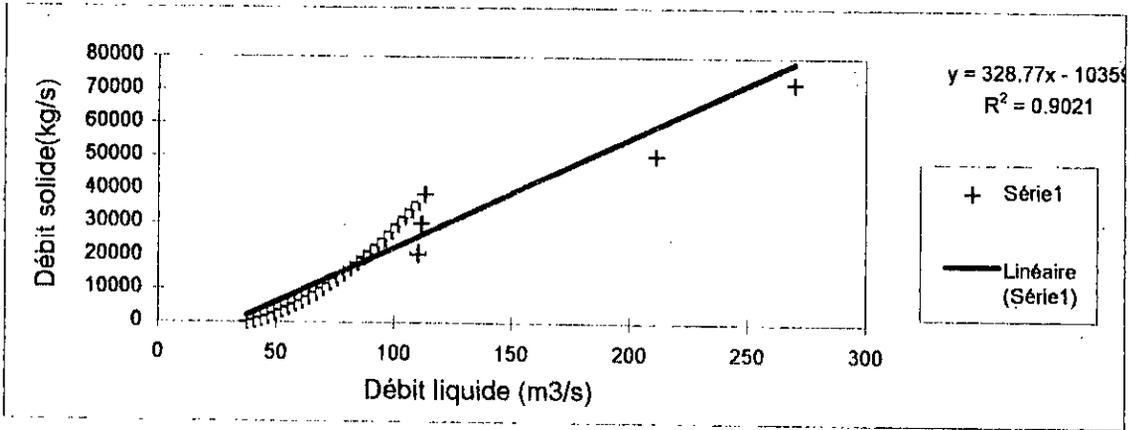
Printemps:décru



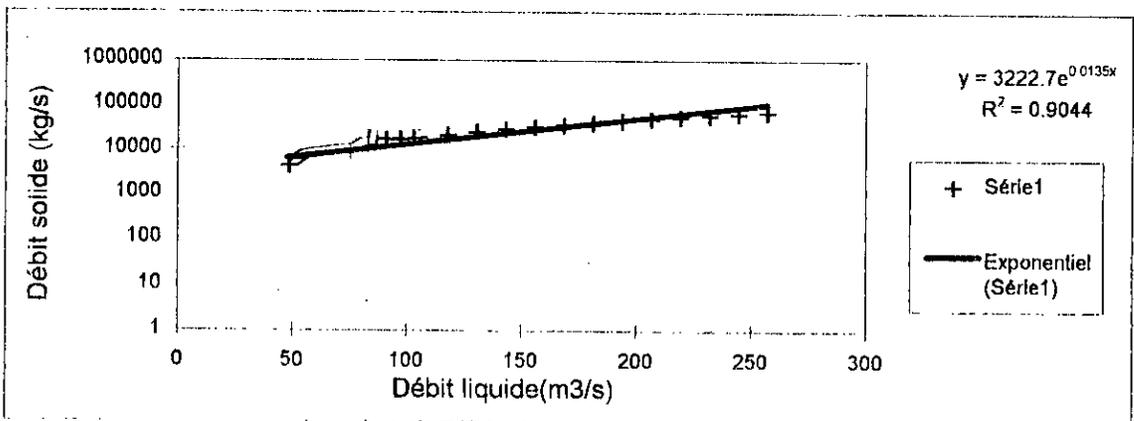
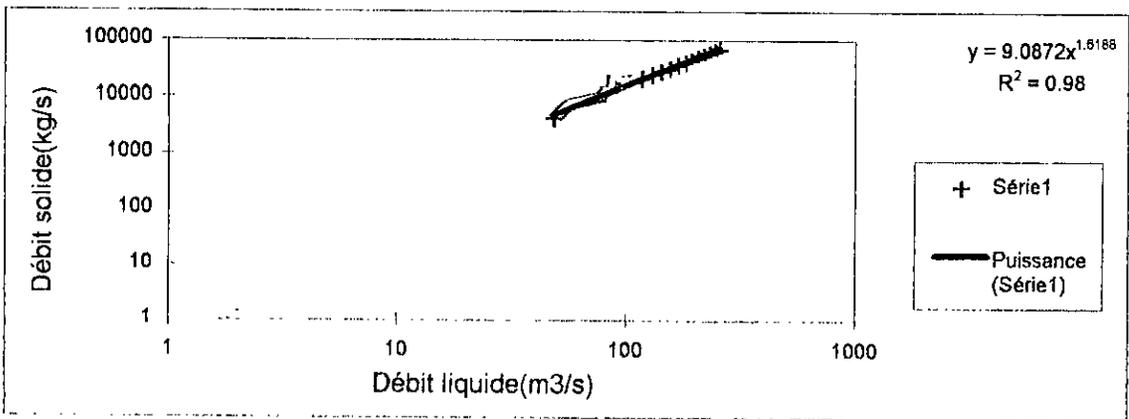
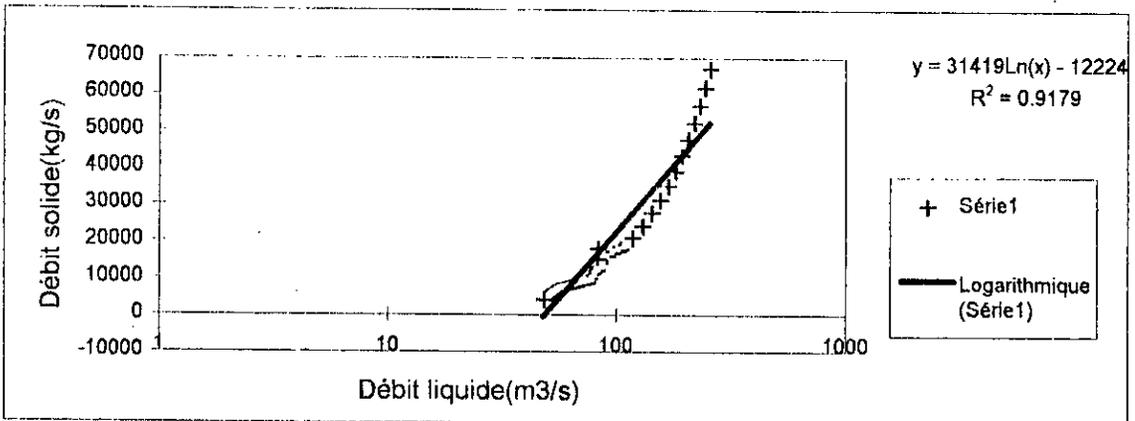
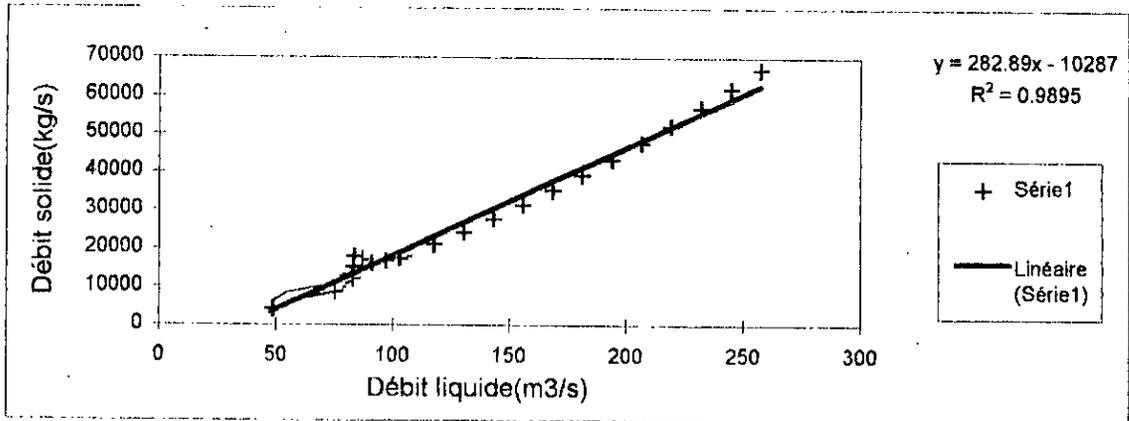
Eté



Eté : montée de la crue



Eté: décroue



ANNEXE 2

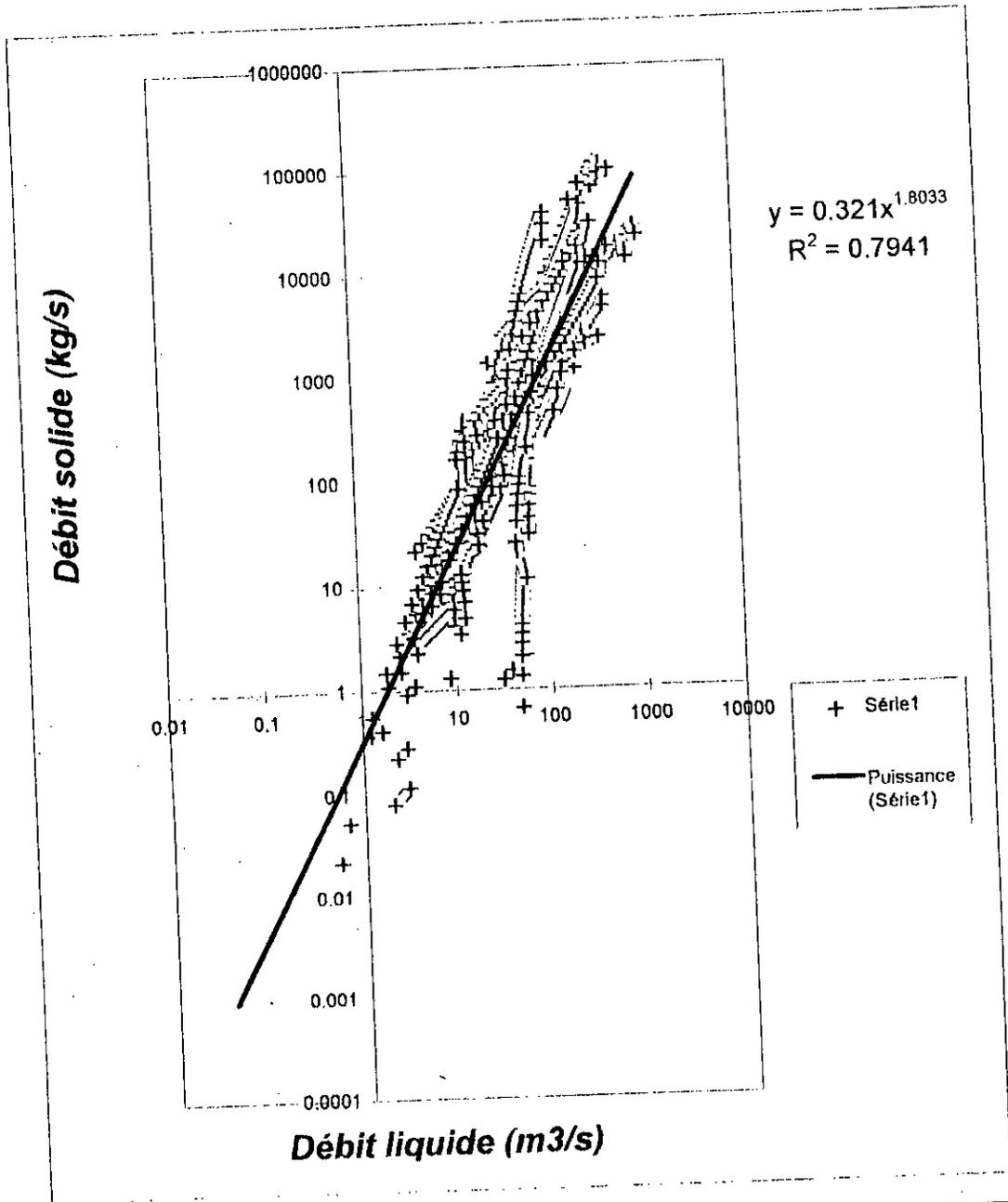
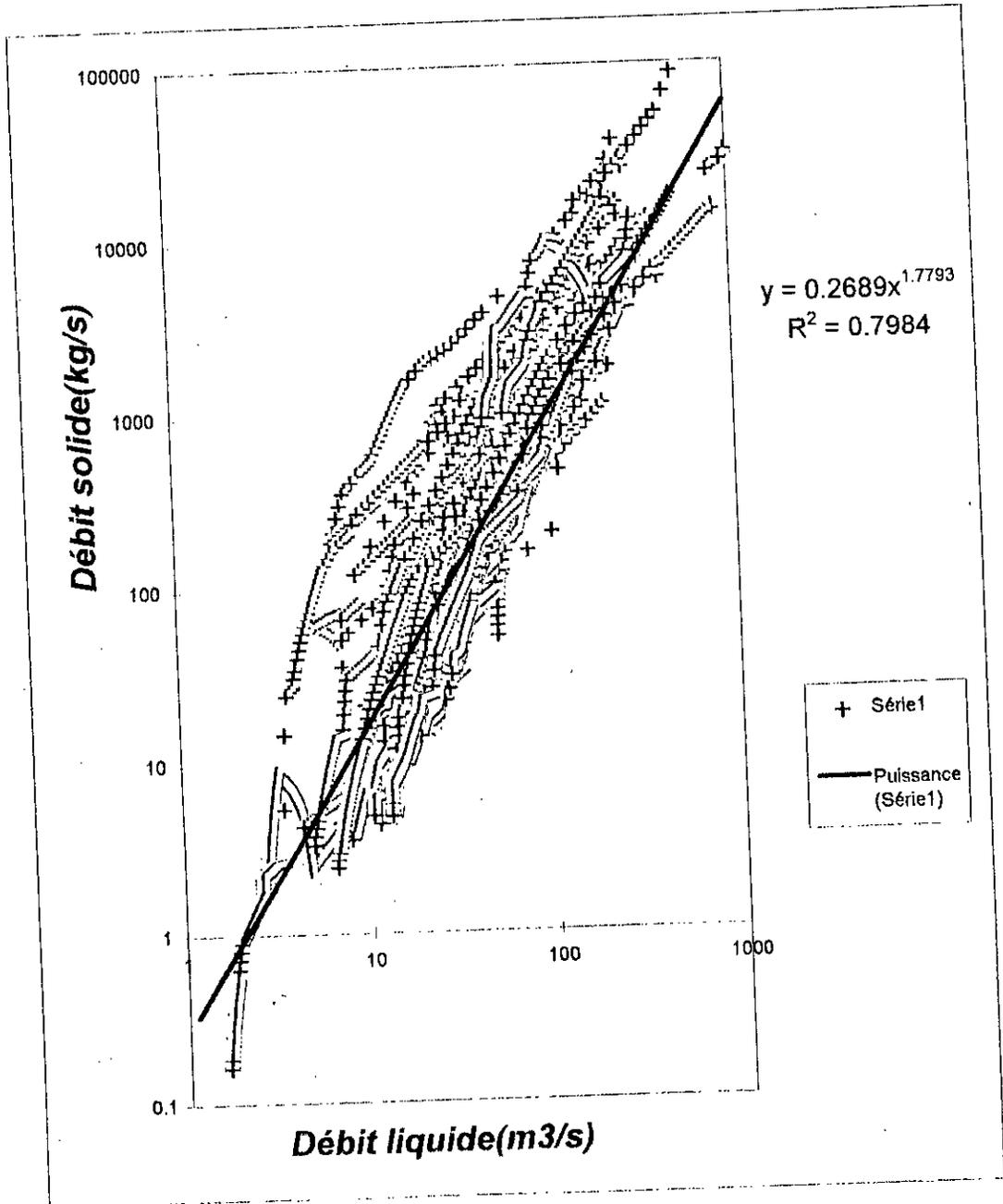
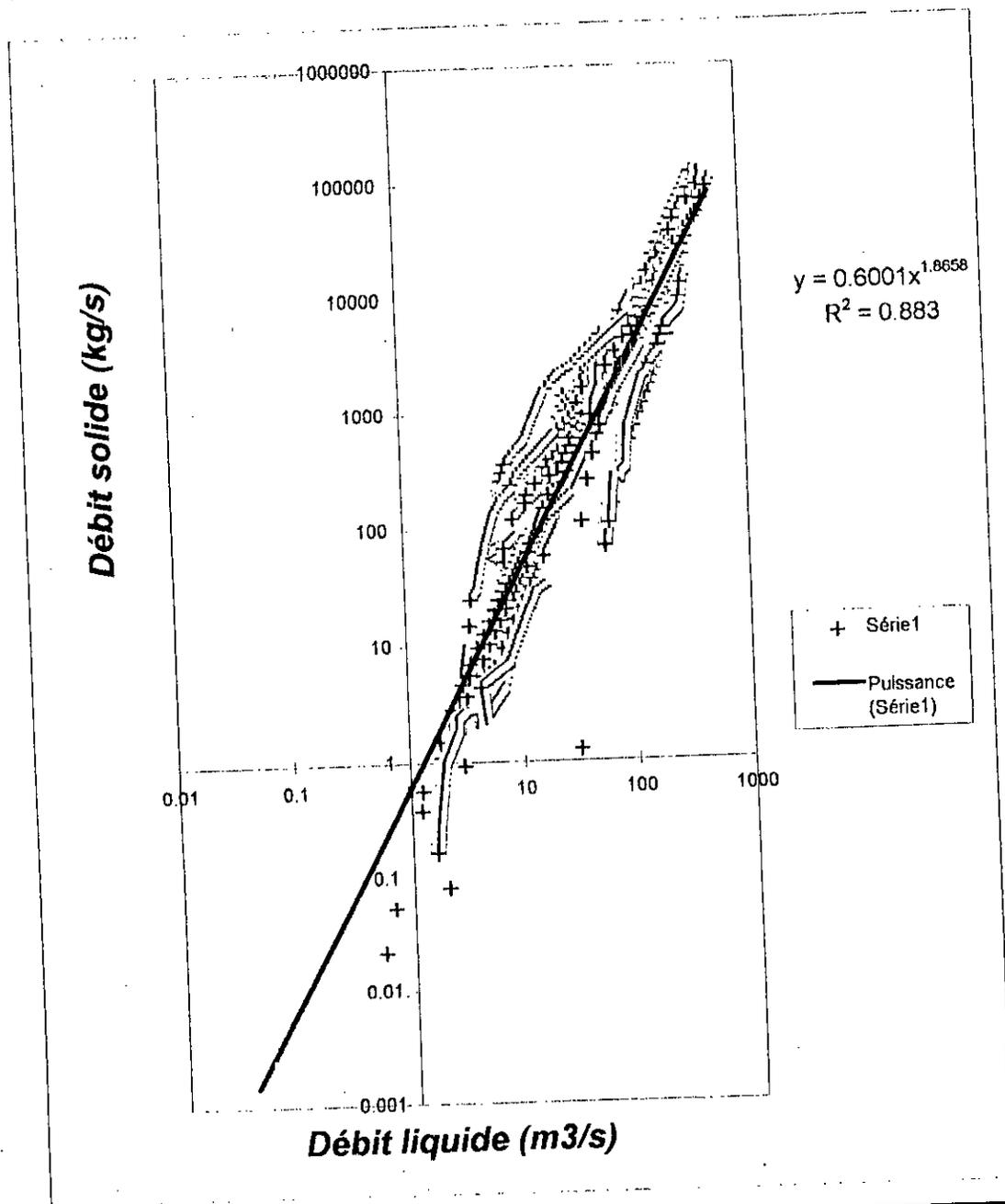


FIG DROITE DE REGRESSION DEBIT LIQUIDE - DEBIT SOLIDE
 BASSIN DE L'ISSER - STATION DE LAKADARIA (090501)
 SERIE DE 1974 A 1985 : MONTÉE DE LA CRUE

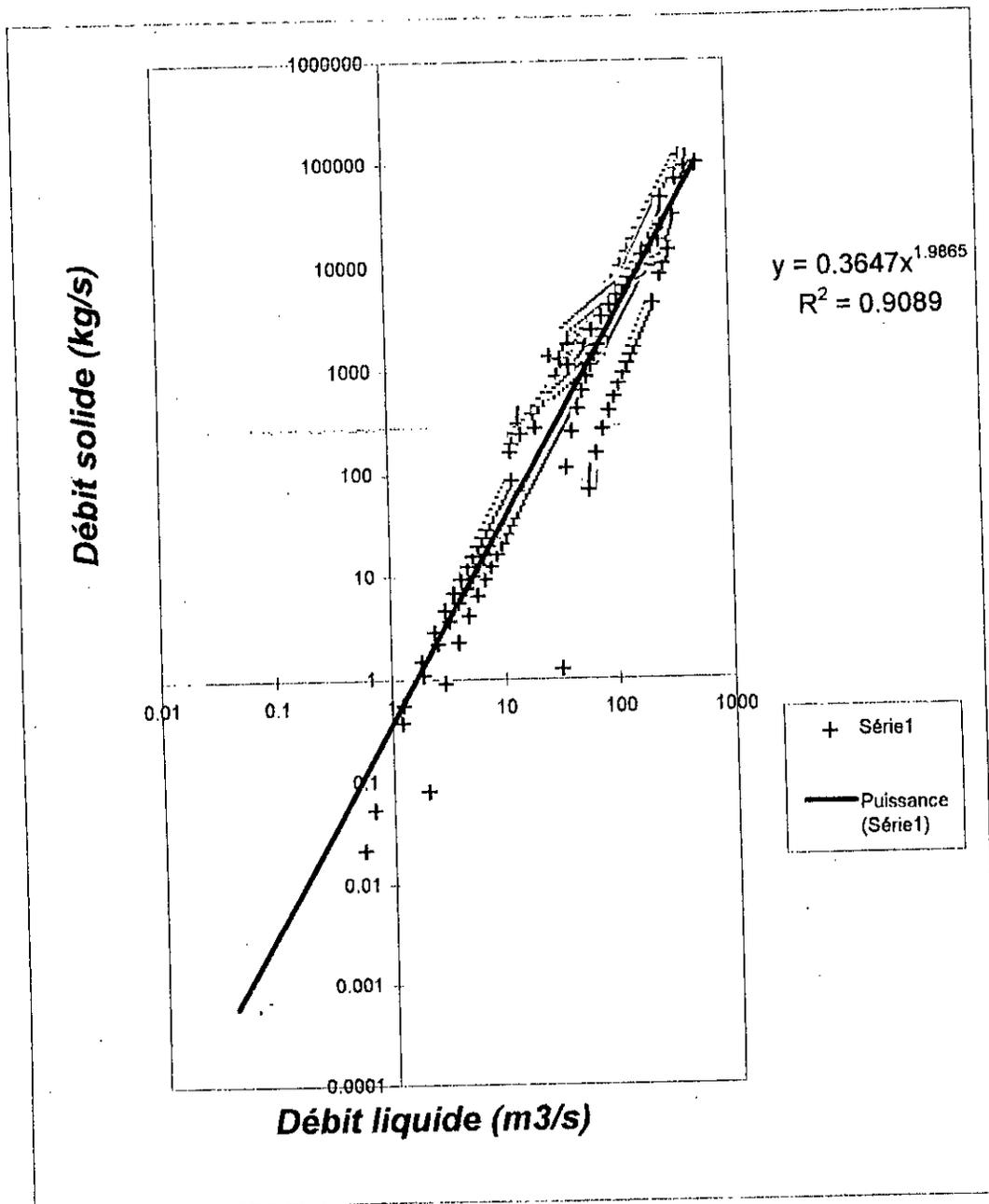


DROITE DE REGRESSION DEBIT SOLIDE-DEBIT LIQUIDE
 BASSIN DE L'ISSER - STATION DE LAKADARIA (090501)
 SERIE DE 1974 A 1985 : LA DECRUE

FIG



DROITE DE REGRESSION DEBIT SOLIDE-DEBIT LIQUIDE
 BASSIN DE L'ISSER STATION DE LAKADARIA (090501)
 SAISON D'AUTOMNE
 FIG



DROITE DE REGRESSION DEBIT SOLIDE - DEBIT LIQUIDE
 BASSIN DE L'ISSER - STATION DE LAKHARIA (090501)
 SAISON D'AUTOMNE: LA MONTÉE DE LA CRUE

FIG

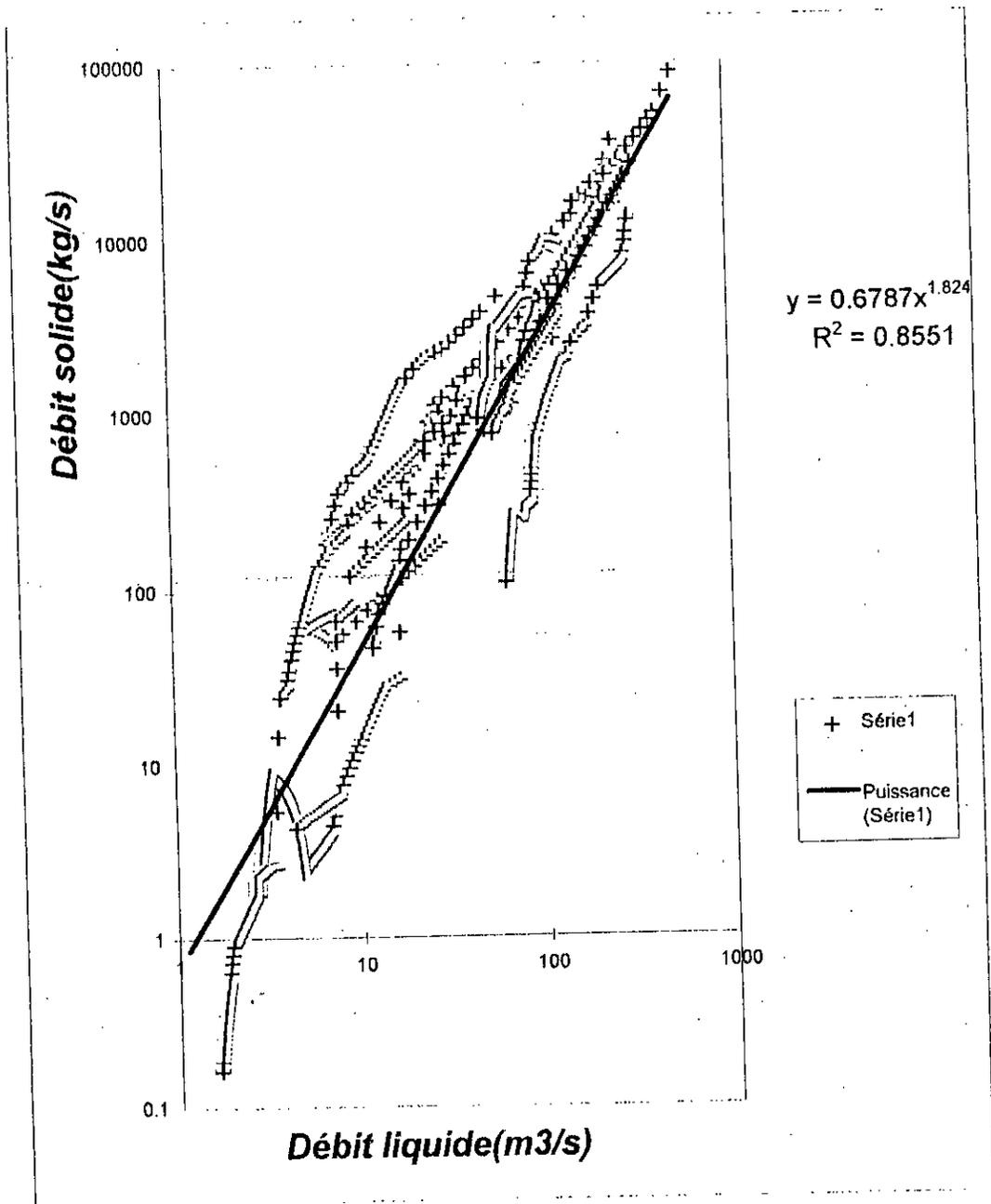
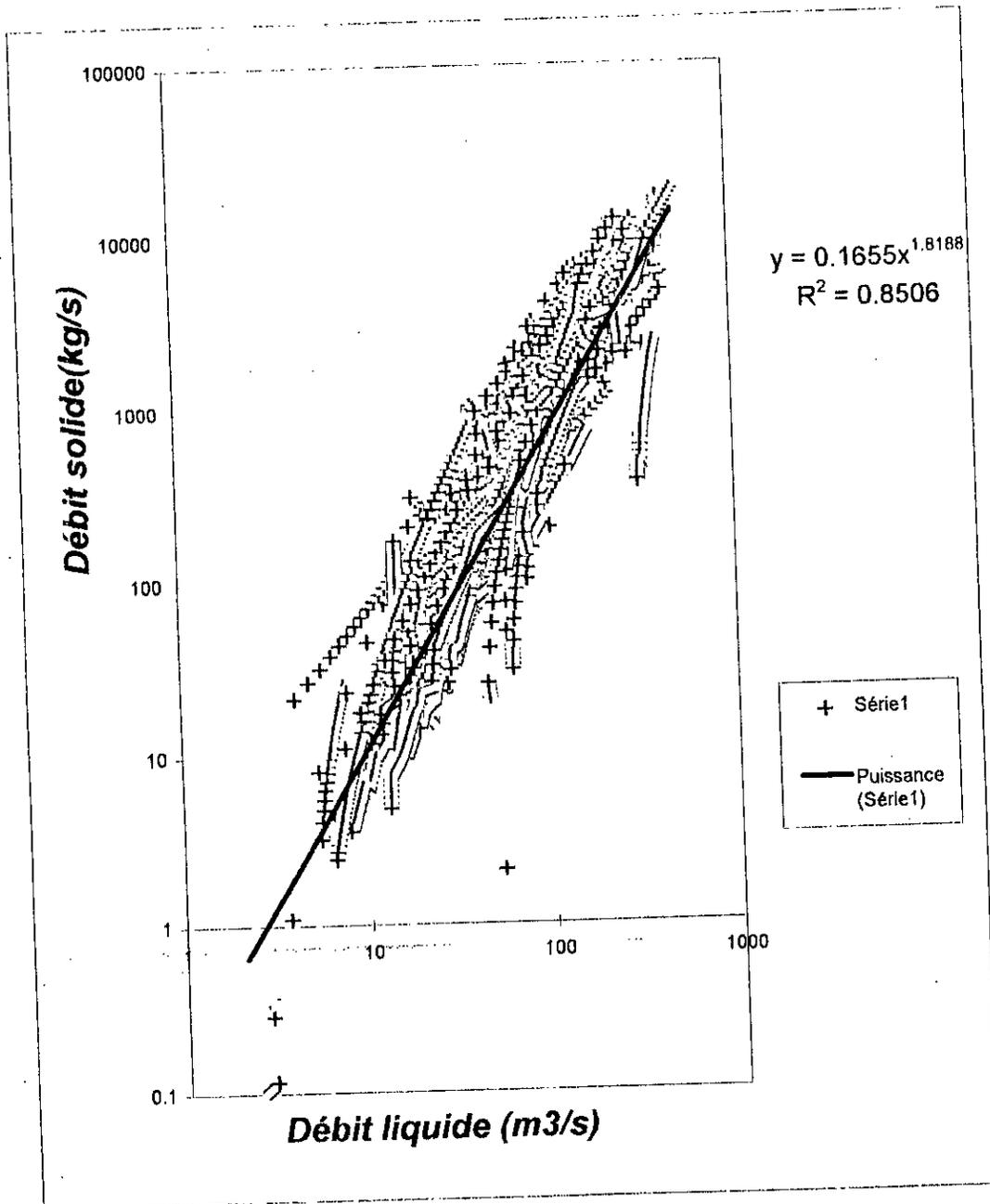


FIG DROITE DE REGRESSION DEBIT SOLIDE-LIQUIDE
 BASSIN DE L'ASSER STATION DE LAKADARIA (090501)
 AUTEUR: LA DEURIE



DROITE DE REGRESSION DEBIT SOLIDE - DEBIT LIQUIDE
 BASSIN DE L'ISSER - STATION DE LAKHDARIA (090501)
 SAISON D'HIVER

FIG.

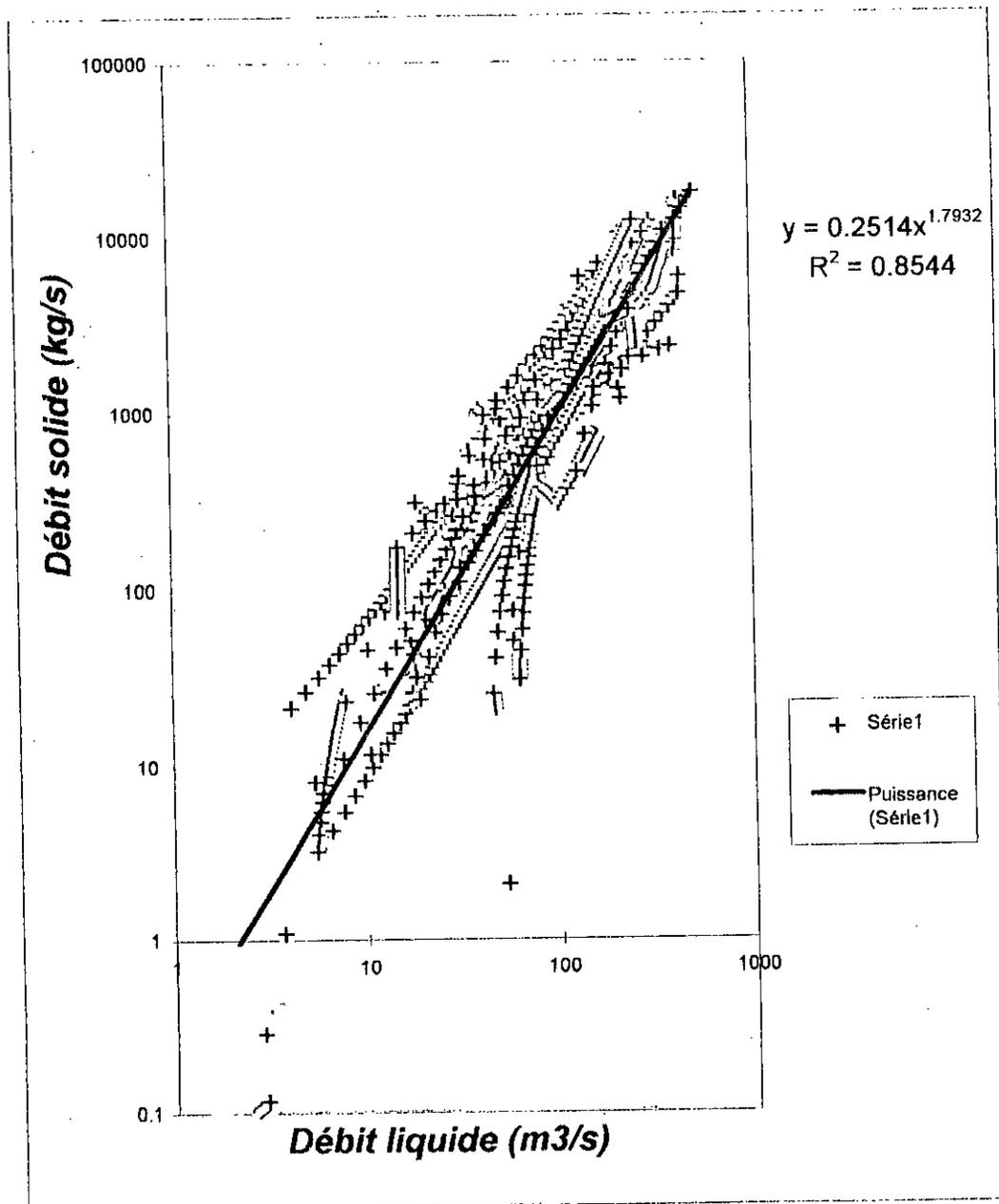
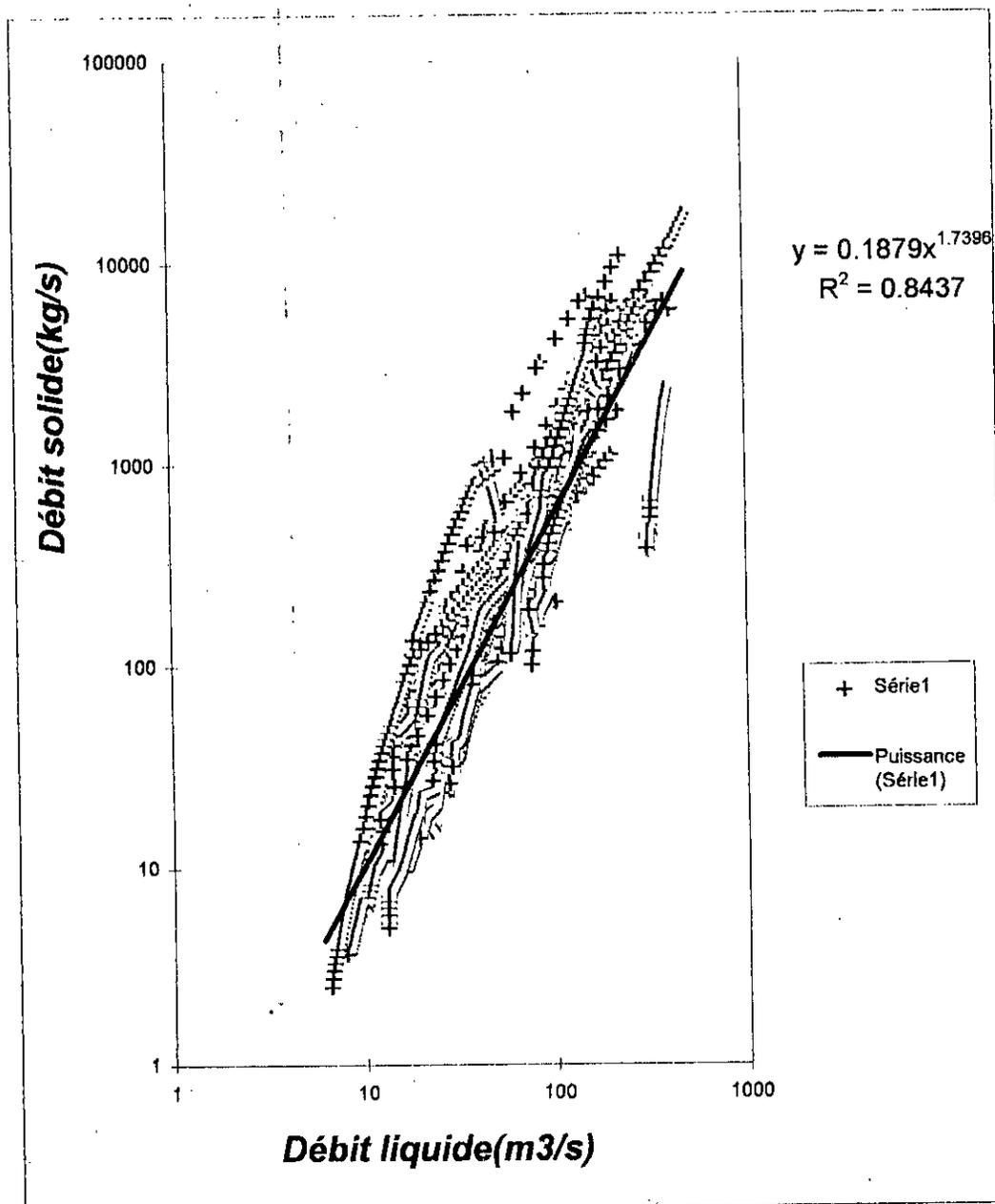
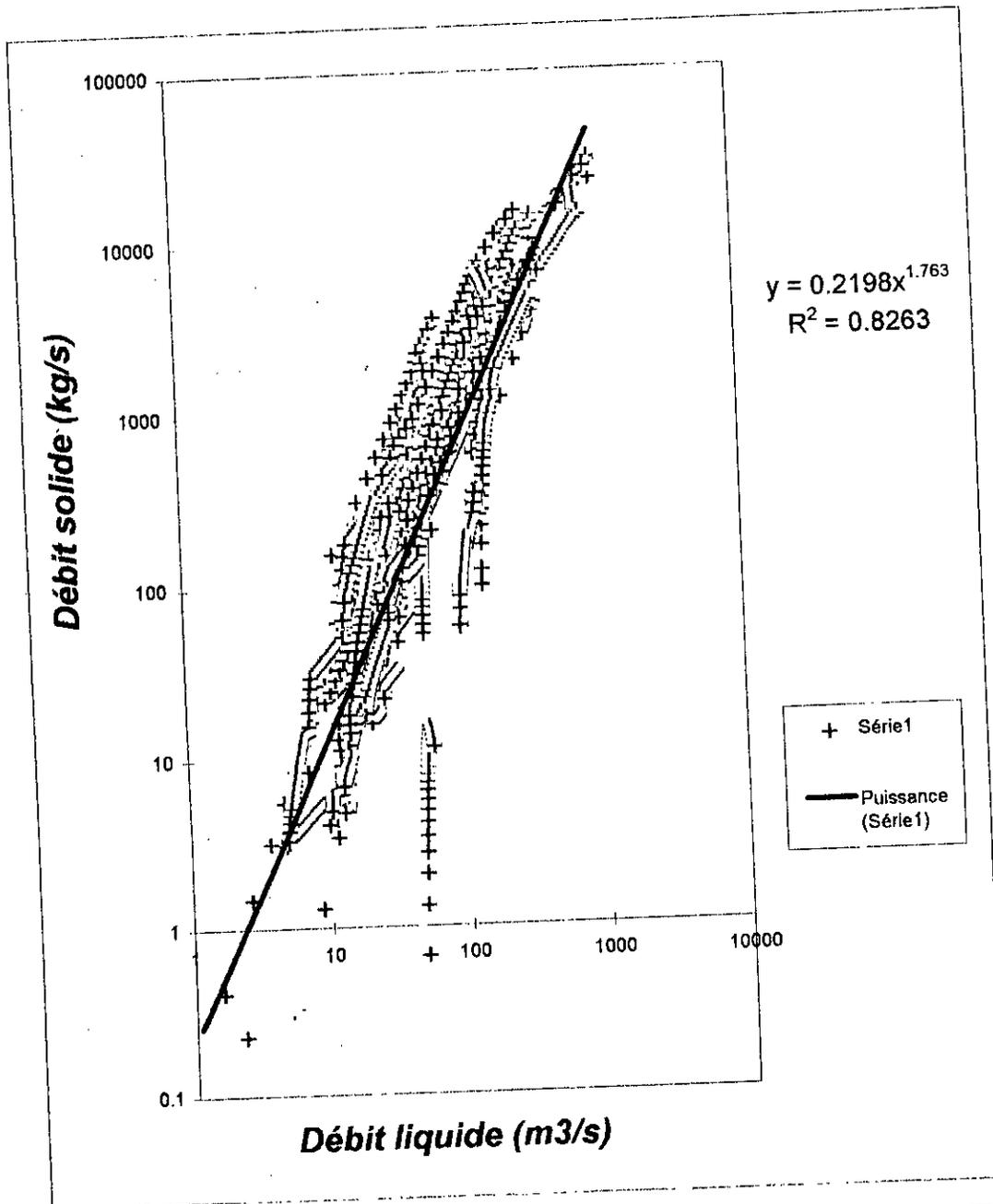


FIG DROITE DE RÉGRESSION DÉBIT LIQUIDE - DÉBIT SOLIDE
 BASSIN DE L'ISSER - STATION DE LAKHARIA (090501)
 SAISON D'HIVER : MONTÉE DE LA CRUE



DROITE DE REGRESSION DEBIT SOLIDE- DEBIT LIQUIDE
 BASSIN DE L'ISSER - STATION DE LAKADARIA (090501)
 SAISON D'HIVER : LA DECORNE
 FIG



DROITE DE REGRESSION DEBIT SOLIDE - DEBIT LIQUIDE
 BASSIN DE L'ISSER - STATION DE LAKHODARIA (090501)
 SAISON DE PRINTEMPS
 FIG

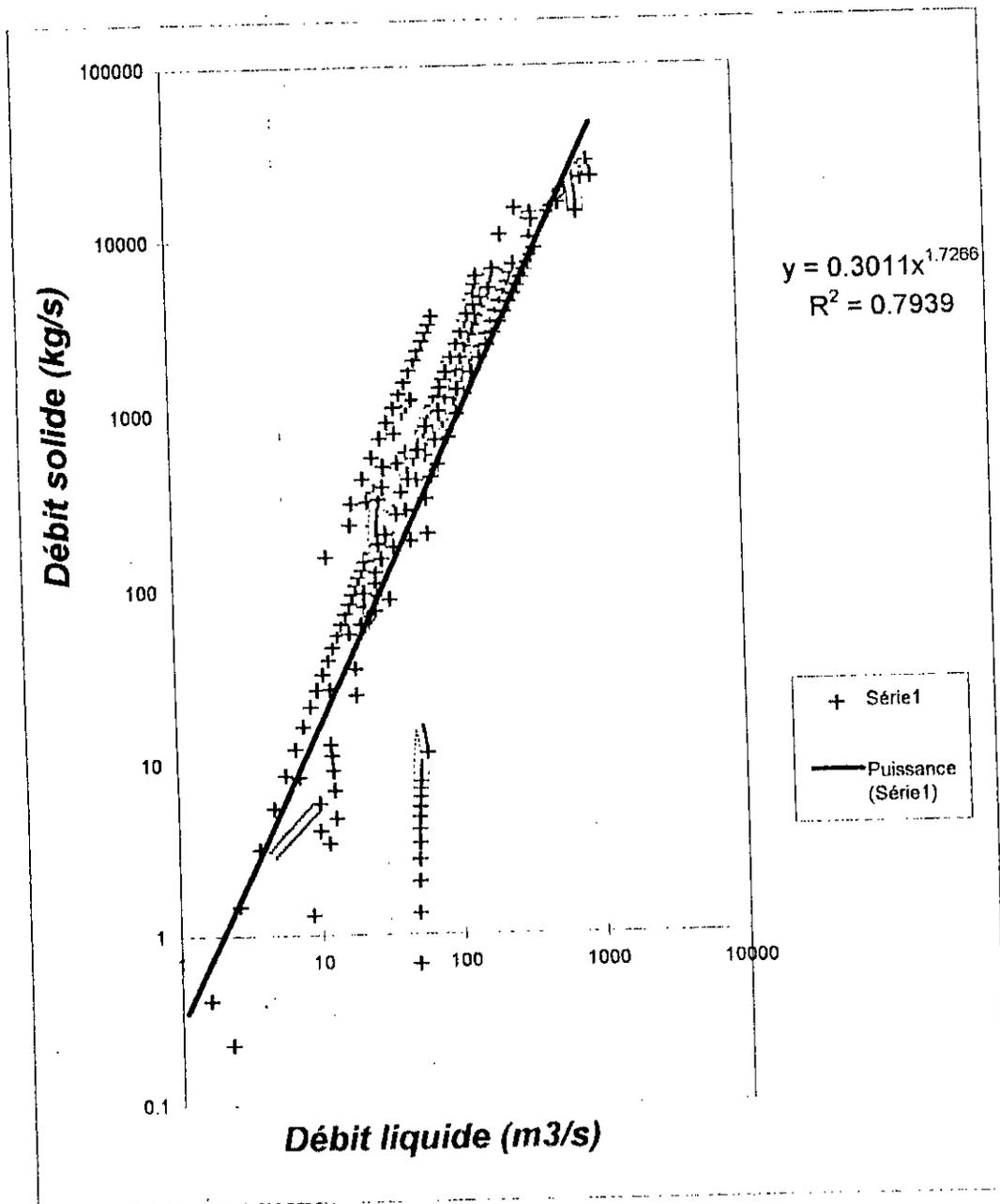
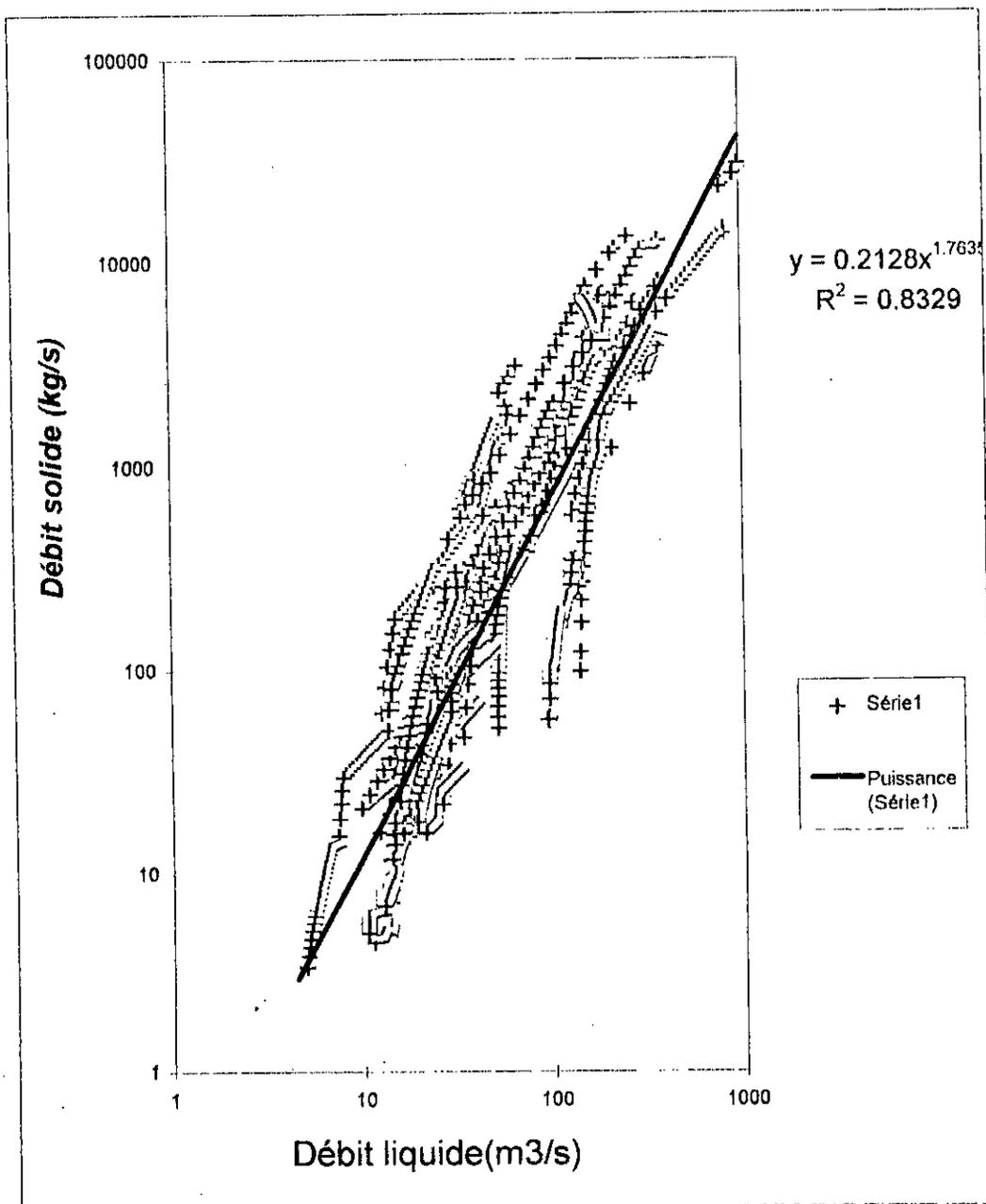
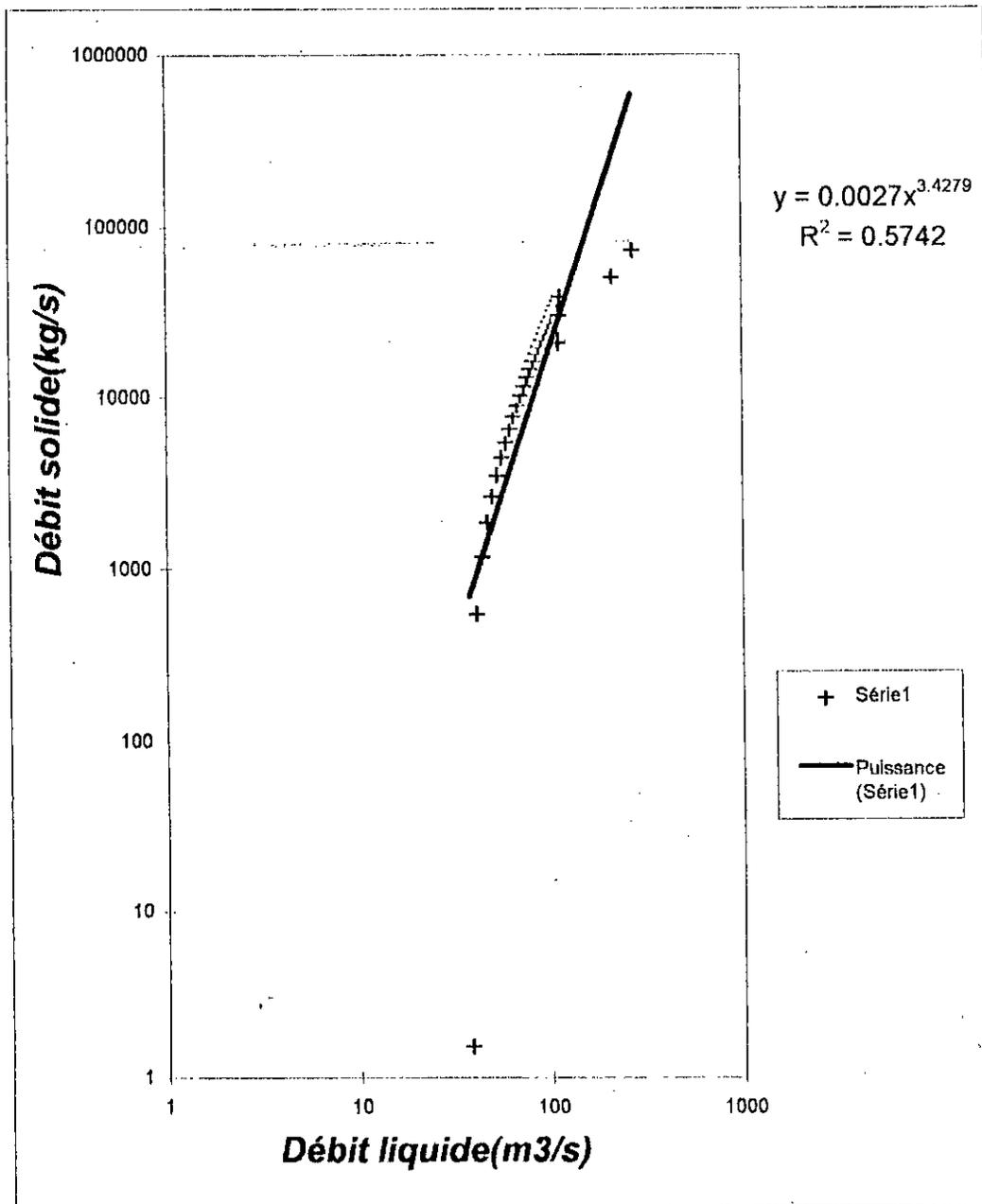


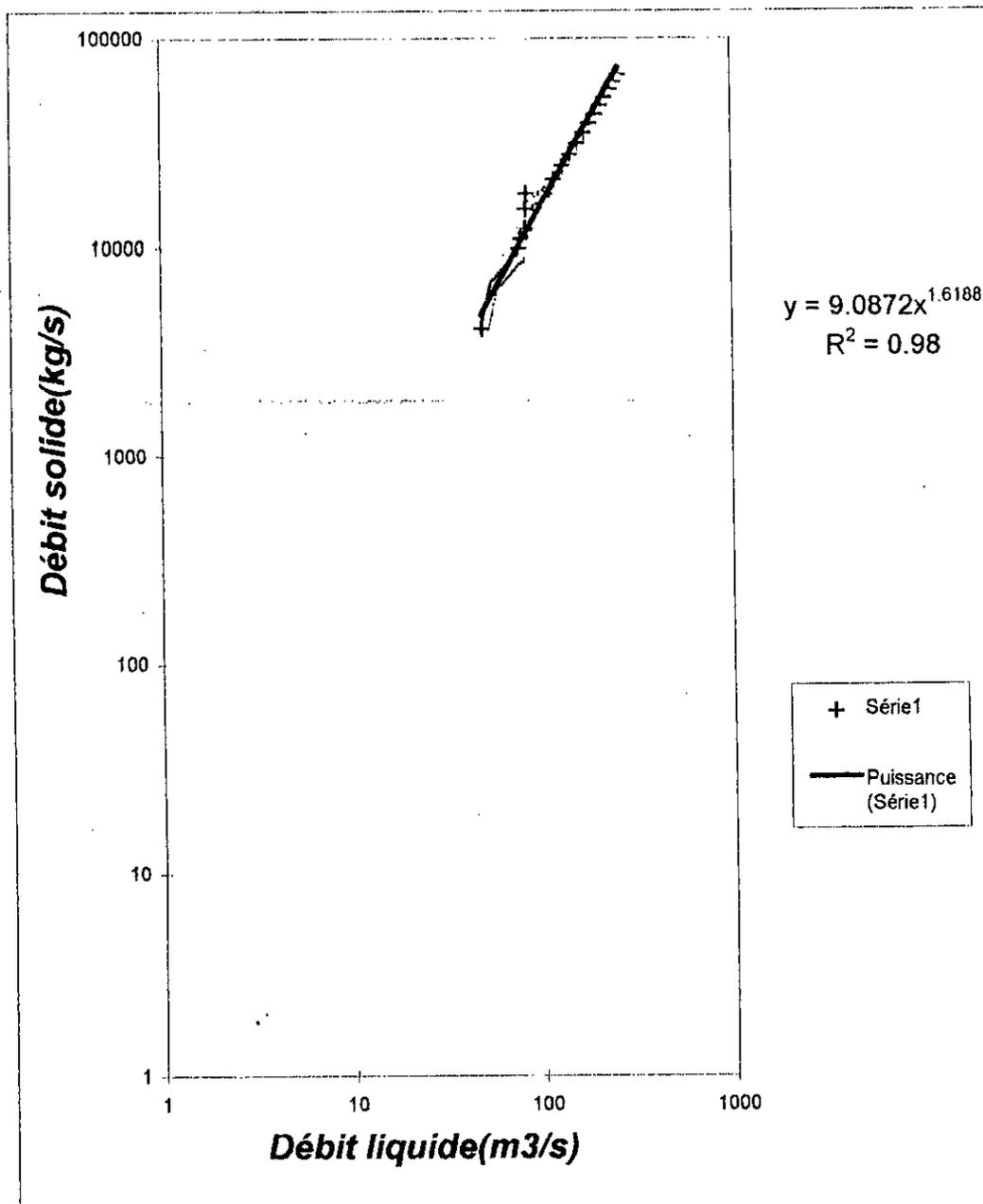
FIG DROITE DE REGRESSION DEBIT SOLIDE - DEBIT LIQUIDE
 BASSIN DE L'ISSER - STATION DE LAKHARIA (090501)
 SAISON DE PRINTEMPS : MONTÉE DE LA CRUE



DROITE DE REGRESSION DEBIT SOLIDE - DEBIT LIQUIDE
 BASSIN DE L'ISSER - STATION DE LAKHDARIA (090501)
 SAISON DE PRINTEMPS : LA DECRUE
 FIG

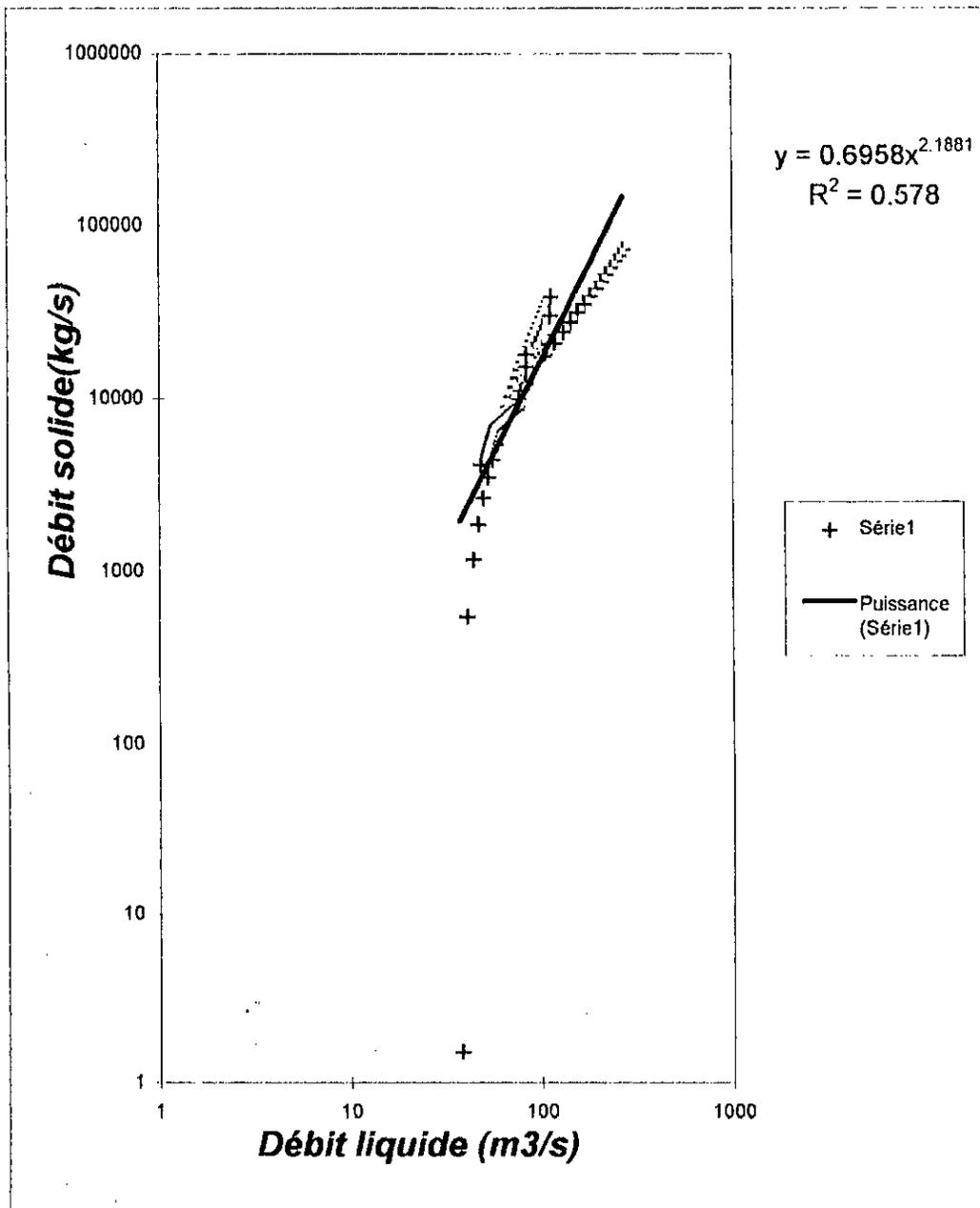


DROITE DE REGRESSION DEBIT SOLIDE - DEBIT LIQUIDE
 BASSIN DE L'ISSER - STATION DE LAKADARIA (090501)
 FIG SAISON D'ETE MONTÉE DE LA CRUE



DROITE DE REGRESSION DEBIT SOLIDE - DEBIT LIQUIDE
 BASSIN DE L'ISSER - STATION DE LAKADARIA (090501)
 SAISON D'ETE : LA DECRUE

FIG



DROITE DE REGRESSION DEBIT SOLIDE - DEBIT LIQUIDE
 BASSIN DE L'ISSER - STATION DE LAKADARIA (090501)
 SAISON D'ETE

FIG

ANNEXE 3

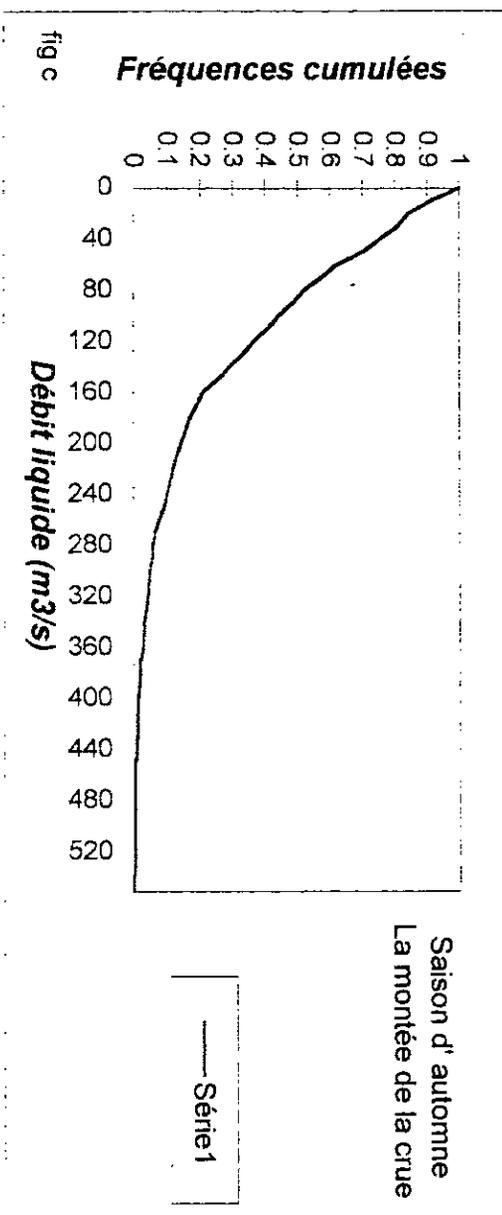
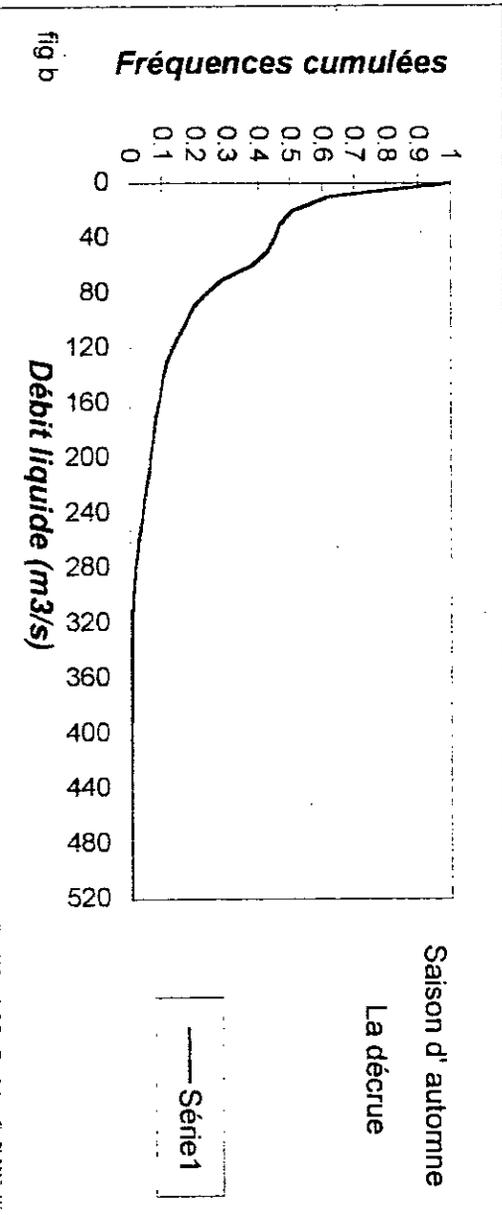
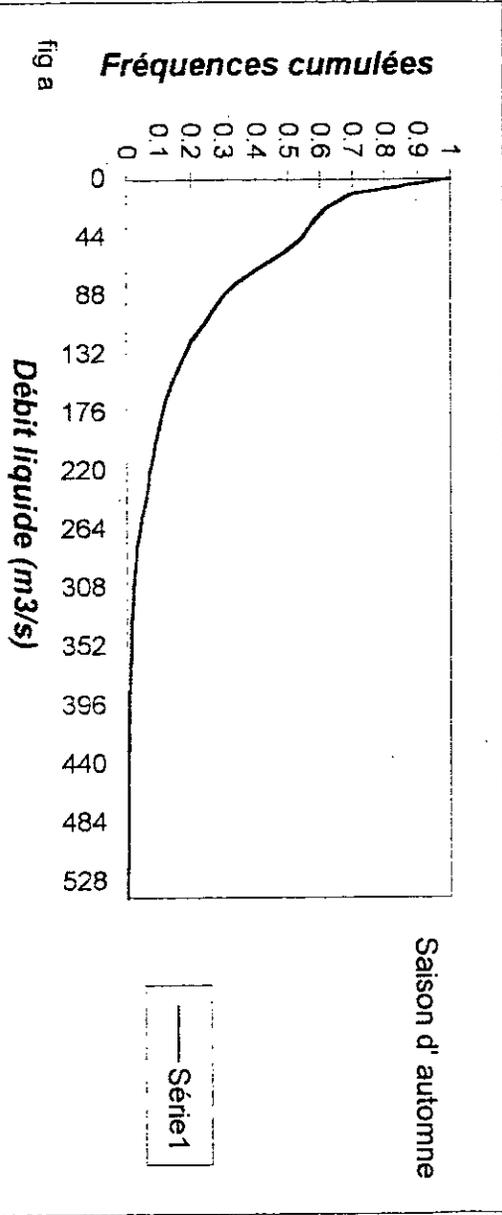
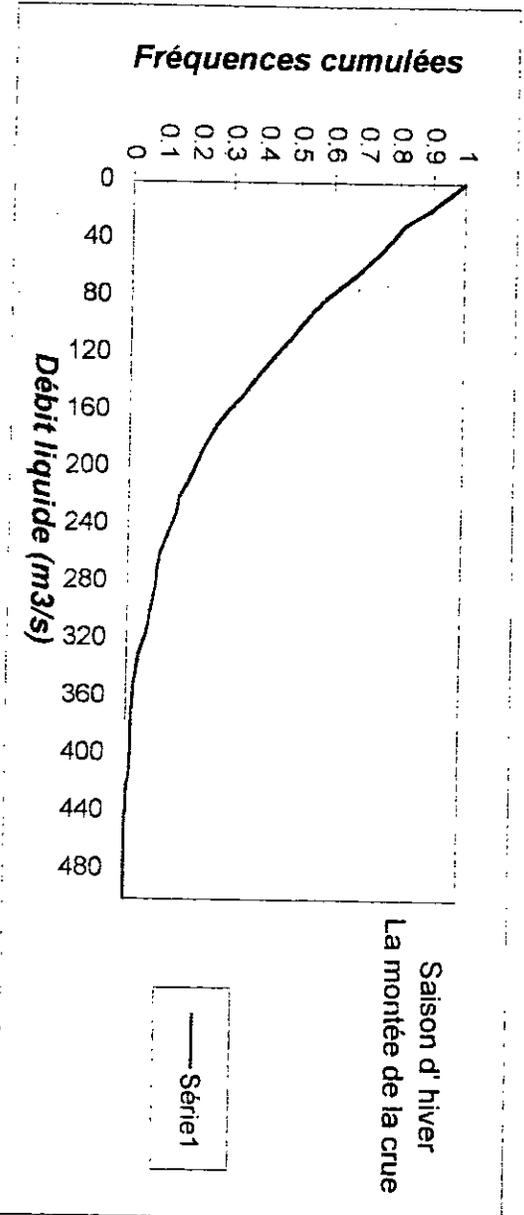
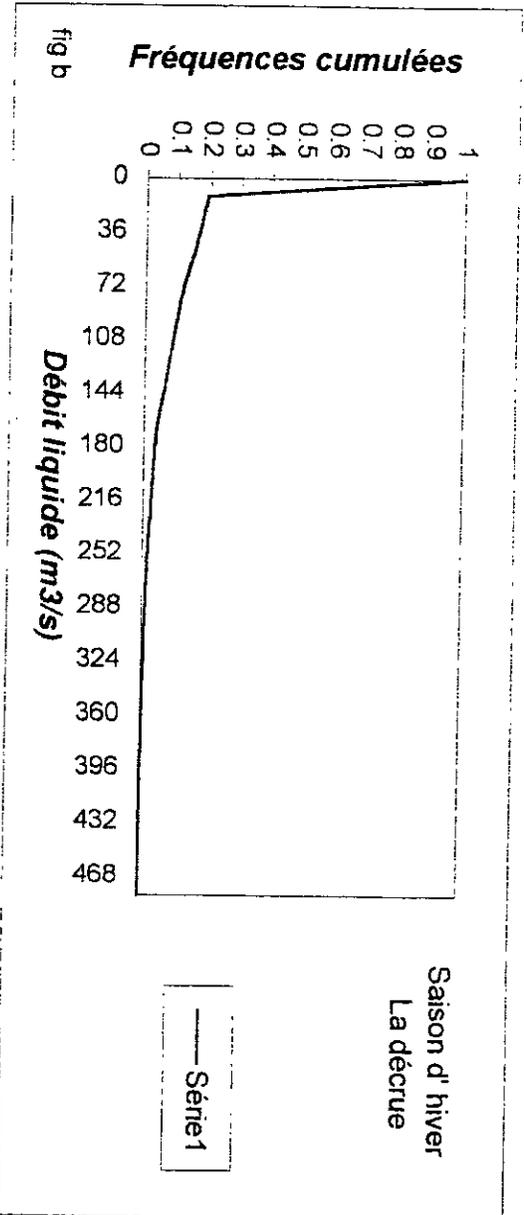
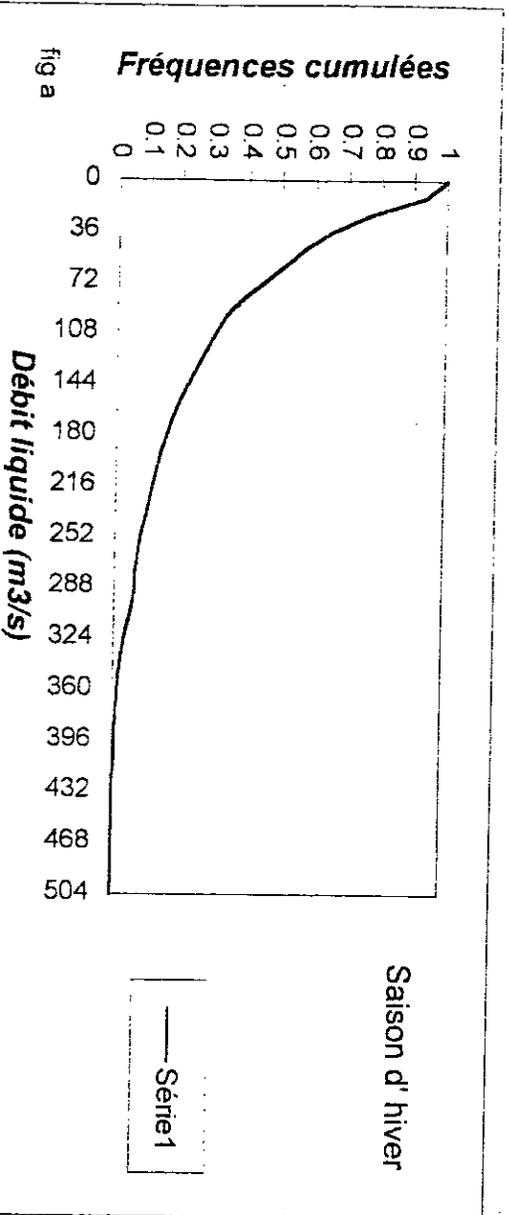


FIG COMPARÉ DES DÉBITS CLASSES
 BASSIN DE L'ISSER. STATION DE L'ARDAIRIA (0090501)
 SAISON D'AUTOMNE



FIG

COURBE DES DÉBITS CLASSES

BASSIN DE L'ISSER : STATION DE LARADARNA (090501)

SAISON D'HIVER

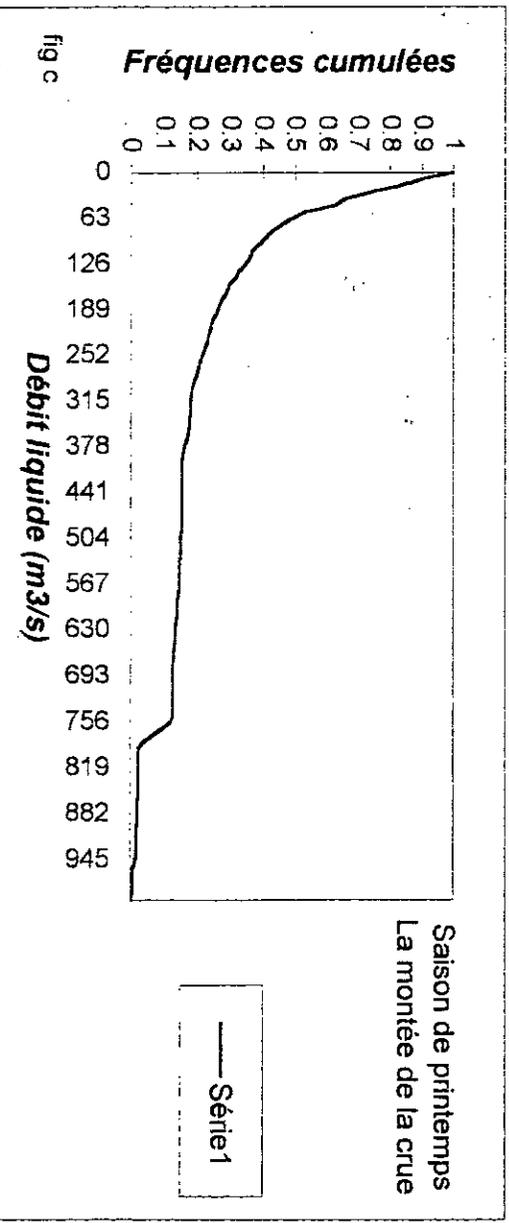
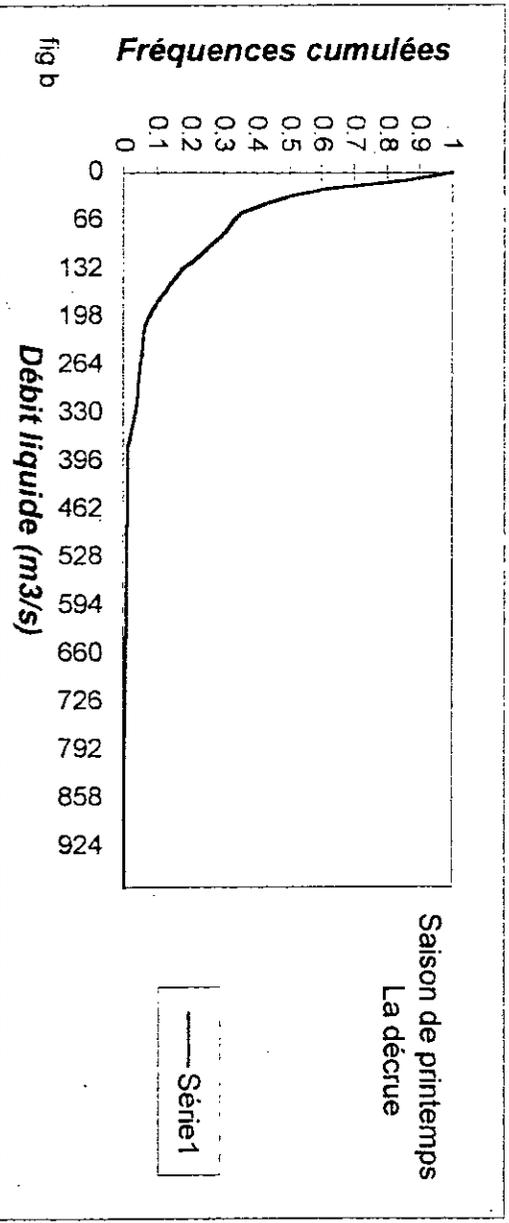
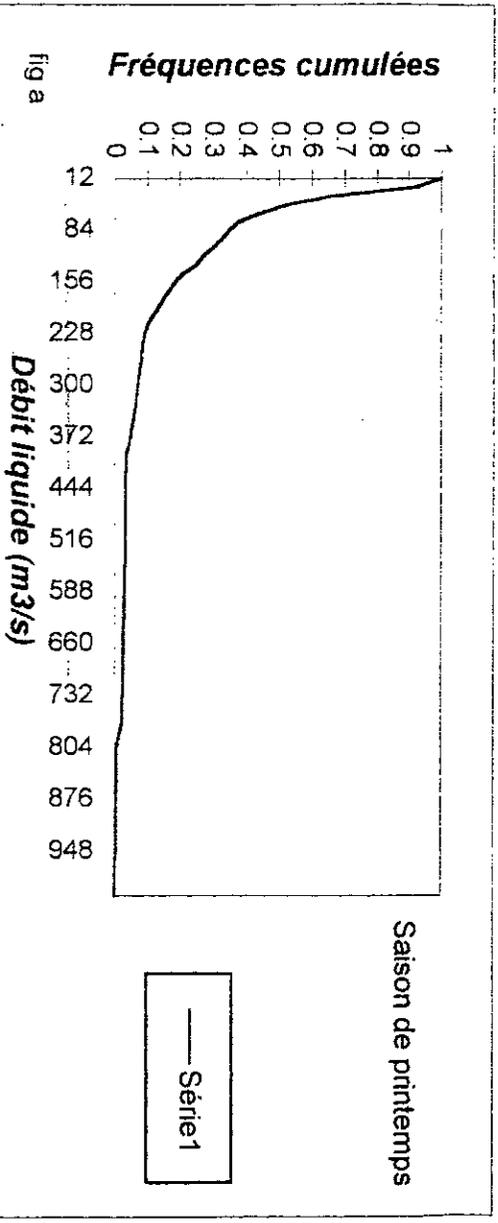


FIG **COMPARAISONS DES DÉBITES CLASSES**
BASSIN DE LA GISSER: STATION DE LA RADAR 1A (090501)
SAISON DE PRINTEMPS

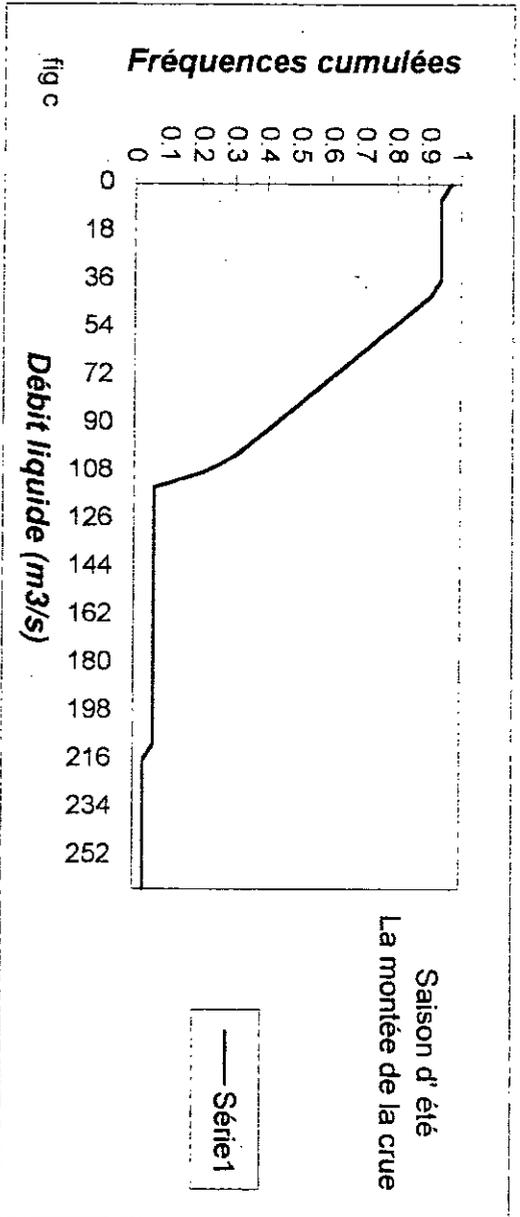
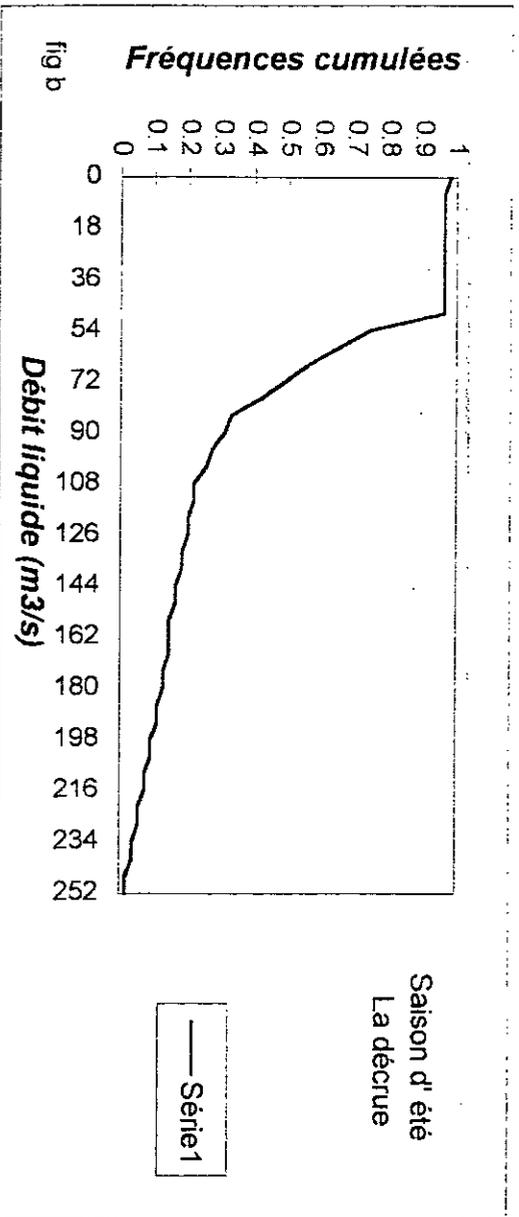
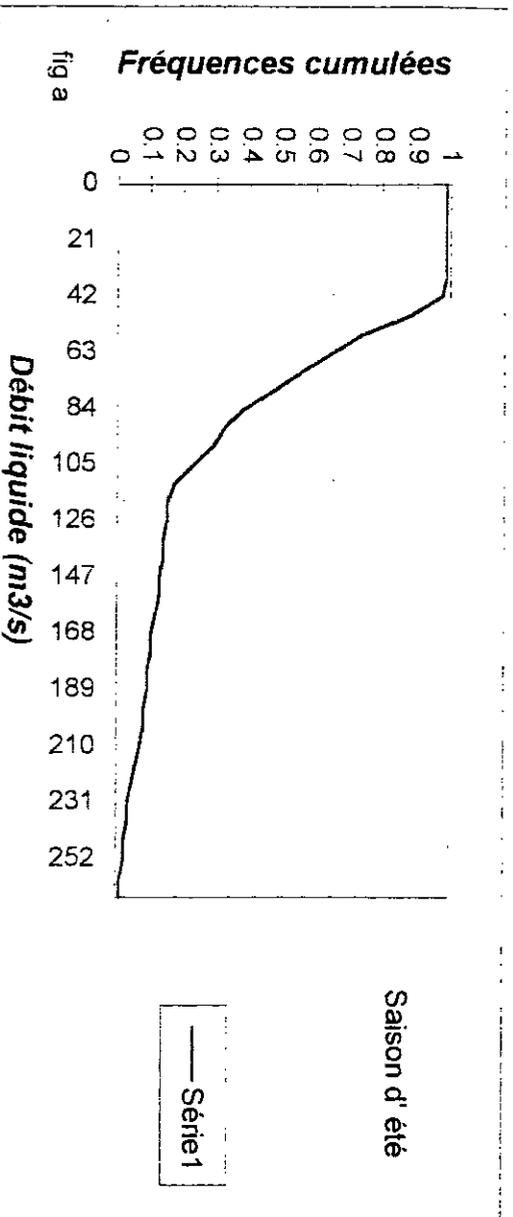


FIG COMBRES DES DÉBITS CLASSES
 BASSIN DE L'ISSER : STATION DE LAKADARA (090501)
 SAISON D'ÉTÉ

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]. AIT MOUHOUB D.: « Modelisation à fonds mobiles », Exposé d'hydraulique approfondie, ENP, Alger.
- [2]. BENHADJ et BOUCHELKIA : « Contribution à la modélisation statistique des transports solides en suspension », thèse d'ingénieur E.N.P. 1994
- [3]. BELKHIRI et BOUKHARTA : « Mise au point d'une méthode de quantification automatique des apports solides à partir de débits liquides », Thèse d'ingénieur E.N.P. 1995.
- [4]. BERKANI et REMINI : « Mécanisme hydrodynamique de l'envasement, approche préliminaire ». Actes du colloque sur l'érosion des sols et l'envasement des barrages. A.N.R.H. 1-3, Décembre 1991.
- [5]. BERNARD BOBEE : « The gamma family and derived distributions applied in hydrology », Water resources publications, U.S.A. 1991.
- [6]. BOWKER. A. H. « Méthodes statistiques de l'ingénieur ». Edition Dunod, Paris, 1965.
- [7]. COMYD 95 : « Actes du premier colloque maghrébin », 1995
- [8]. CHOW. V.T : « Applied hydrology », Edition McGRAW- HILL, Singapour, 1988
- [9]. DAGNELIE.P: « Théorie et méthodes statistiques », édition Les presses agronomiques de Gembloux, Belgique, 1973.
- [10]. DEMMAK.A : « Etude sur l'érosion et le transport solide », thèse de docteur-ingénieur, université de Paris, 1982.
- [11]. DUQUENNOIS : « Sédimentation dans les barrages réservoirs et moyen de lutte », colloque international, université de LIEGE, 4 et 5 Mai 1969.
- [12]. GOURDIN.A : « Méthodes numériques appliquées », O.P.U. Alger, 1991.
- [13]. GUPTAR.R.S: « Hydrology and hydraulique systems », édition Pentrice Hall, New Jersey, U.S.A. 1989.
- [14]. GRISOLLET.H : « Climatologie. Méthodes et pratiques », édition Gauthier-Villars, 1962.
- [15]. HENENSAL-P: « L'érosion extrême des sols par l'eau : approche quantitative et mécanismes », Rapport de recherche L.P.C. N° 138, Paris, Mars 1986.

- [16].KASSOUL.M: « Contribution à l'étude de la sédimentation des barrages en Algérie », thèse d'ingeniorat E.N.S.H., Blida 1991.
- [17]. LINSLEY.R.K. « Hydrology for engineers », édition :International student, Singapour, 1984.
- [18].LALLAM.L : « Statistique et informatique : les statistiques sous Pascal, G.W.Basic et le langage graphique ». Edition Atlas, 1993
- [19].MAHDI.T et MACHANE.K : « L'hydraulique de la sédimentation des retenues : une approche par modèle mathématique de la formation de delta », thèse d'ingeniorat, E.N.P, Alger 1993.
- [20].MEDDI. N: « Etude du transport solide à l'échelle de la crue dans le bassin de l'oued Mina », Algérie equipement,E.N.T.P, N° 13, 1994.
- [21].MENDENHALL : « Introduction to probability and statistics », édition Duxbury Press, Massachusetts, U.S.A.1975.
- [22].REMINERAS.G: « L'hydrologie de l'ingénieur », édition Eyrolles 1972.
- [23].REMINI.B : « Etude hydrodynamique du mécanisme d'envasement », thèse de magister E.N.P. Alger 1990.
- [24].SAIDI.A: « Erosion spécifique et prévision de l'envasement », Actes du colloque sur l'érosion des sols et l'envasement des barrages. A.N.R.H. 1-3 Décembre, 1991.
- [25].SALAS.G.D, DELLEUR.G.W, YEVJEVICH.V and LANE.W.L: « Applied modeling of hydrology time series », édition Water resources publication, U.S.A. 1985
- [26].SOGREAH: « Etude de schéma directeur des ressources en eau du Chellif », Canada 1984.
- [27].TOUAIBIA. B: « Quantification de la salinité et du transport : cas du bassin de l'oued Deurdeur », thèse de magister, I.N.A , Alger 1986